



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Maria João Gonçalves Ramos

**Otimização topológica de microvigas  
reticuladas fundidas**



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Maria João Gonçalves Ramos

**Otimização topológica de microvigas  
reticuladas fundidas**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:  
**Professor Doutor Vítor Carneiro**

e coorientação do:  
**Professor Doutor Hélder Puga**

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição-NãoComercial**

**CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

## Agradecimentos

Na fase final deste documento, gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram, de uma forma ou de outra, para o desenvolvimento e conclusão da minha tese. A todos vós expresso aqui a minha gratidão:

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Vítor Carneiro, por todos os conselhos, por todo o apoio para tentar fazer sempre melhor, por todo o conhecimento transmitido, por me dar a confiança necessária para atingir os desafios propostos e, pela constante disponibilidade e preocupação.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Doutor Hélder Puga, pelo auxílio e conhecimento transmitido na componente prática do trabalho.

Agradeço aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelos valores transmitidos, por acreditarem sempre em mim, por não me deixarem ir abaixo em momentos de maior fragilidade e por me fazerem sempre acreditar na conquista de novos desafios na minha vida.

Agradeço à minha irmã pela paciência, pela partilha de conhecimento, pela motivação constante, por me mostrar sempre o caminho e as escolhas certas e por ser minha confidente em todas as horas.

E, por último, agradeço ao resto da minha família e amigos próximos, que me acompanharam nesta jornada e sempre tiveram uma palavra de força e incentivo quando necessária.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## **STATEMENT OF INTEGRITY**

I declare that I have acted with integrity in the preparation of this academic work and confirm that I have not resorted to plagiarism or any form of misuse or falsification of information or results in any of the stages leading to its preparation.

I further declare that I know and have respected the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

Universidade do Minho, 31 de outubro de 2022

## Resumo

Devido à constante necessidade de cada vez mais melhorar o comportamento mecânico e respostas estruturais, são requeridas e procuradas constantemente formas para melhorar as suas propriedades como resistência mecânica, rigidez, capacidade de absorção de energia e de amortecimento, sendo que estas propriedades podem atualmente ser adquiridas de diversas formas.

Utilizar estruturas reticuladas é uma alternativa cada vez mais popular. Engenheiros de projeto aproveitam frequentemente estruturas *lattice* para componentes aeroespaciais ou automóveis, maquinaria industrial ou área biomédica, de forma a reduzir o peso das peças, mantendo a integridade estrutural e resistência necessária. As estruturas *lattice* 3D periódicas têm desta forma tido destaque, no entanto, outros tipos de sólidos celulares podem ser igualmente interessantes.

Deste modo, o presente trabalho, propõe e apresenta uma forma de obter estruturas *lattice*, em concreto 2D não periódicas, com o intuito de produzir microvigas reticuladas (*microlattice beams*), não só para função estrutural, mas também para absorção de vibrações. O objetivo é deduzir formas reticuladas das microvigas por topologia, fazendo rotinas de otimização para a reduzir a massa e avaliar como varia a rigidez das estruturas aquando do processo de obtenção de estruturas reticuladas. Para tal, sugere-se o uso da ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys* em dois modos, o *Static Structural* e o *Modal*, com o intuito de no final conseguir-se comparar os resultados das microvigas otimizadas em ambos os modos e ver quais as melhores formas, com mais rigidez e melhor relação de rigidez sobre a massa e qual o melhor método (estático ou modal). A partir dos resultados da otimização com restrição de fabricação, selecionou-se pelo estudo estático, a topologia da microviga com percentagem real de 44% e pelo estudo dinâmico a microviga com percentagem real de 68%. É proposto assim que estas microestruturas obtidas com uma configuração de sólido celular possam ser uma solução para obter boas propriedades mecânicas estáticas/dinâmicas e ao mesmo tempo baixa densidade específica.

Quanto à fabricação destas estruturas microreticuladas, é proposta e utilizada uma técnica híbrida inovadora que combina o fabrico aditivo com a fundição por modelo perdido. É concluído que o processo de fabrico desenvolvido para as estruturas microreticuladas consideradas ainda precisa de limar alguns aspetos associados principalmente à eliminação da resina e ao estudo do seu ciclo térmico.

---

### **PALAVRAS-CHAVE**

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA; ESTRUTURAS MICRORETICULADAS (MICROLATTICE); RIGIDEZ; FABRICO ADITIVO; FUNDIÇÃO POR MODELO PERDIDO

## Abstract

Due to the constant need to increasingly improve the mechanical behavior and also the structural responses, ways to improve their properties are constantly searched for and required such the mechanical strength, stiffness, energy and damping absorption capacity. Indeed, these properties can currently be acquired in different ways.

Using lattice structures is an increasingly popular alternative. Design engineers usually use lattice structures for aerospace and automobile components, industrial machines, or in the biomedical area, in order to reduce the pieces' weight, keeping the structural integrity and the necessary strength. The 3D lattice periodical structures have been highlighted. However, other types of cellular solids can be equally interesting.

Thus, the present work purposes and presents a way to obtain 2D non-periodical lattice structures in order to produce microlattice beams, not only to assure the structural function but also to absorb the vibrations. The main goal is to deduce lattice ways of the micro beams by topology, defining optimization routines to reduce the mass and emulate the variation of the stiffness of the structure during the obtaining process of the lattice structures. To achieve the purpose objective, the Topology Optimization tool of the Ansys software was used considering two modes: the Static Structural and the Modal. This methodology allows comparing the results of the optimized microlattice beams in both modes and evaluating which are the better shapes, with higher stiffness, the best stiffness-mass ratio and which are the best method (static or modal). From the optimisation results with the manufacturing constraint, the topology of the micro beam with the real percentage of 44% was selected considering the static study. From the dynamic study, the micro beam with the real percentage of 68% was selected. Thus, it is suggested that these microstructures obtained with a cellular solid configuration can be a solution to obtain high static and dynamic mechanical properties and, at the same, lightweight characteristics.

Regarding the manufacturing of the microlattice structures, it is purposed and used an innovative additive manufacturing assisted investment casting technique. The work shows that the manufacturing process developed for the considered microlattice structures still needs to be improved considering some aspects mainly related to the elimination of the resin and the study of its thermal cycle.

---

### KEYWORDS

TOPOLOGY OPTIMIZATION; MICROLATTICE STRUCTURES; STIFFNESS; ADDITIVE MANUFACTURING; INVESTMENT CASTING

# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos da dissertação .....	4
1.3. Organização da dissertação .....	4
2. Estado de Arte .....	7
2.1. Estruturas <i>lattice</i> .....	7
2.1.1. Propriedades das estruturas <i>lattice</i> .....	9
2.1.2. Aplicações das estruturas <i>lattice</i> .....	11
2.2. Fabricação das microestruturas reticuladas ( <i>microlattice</i> ) .....	14
2.2.1. Fabrico convencional .....	14
2.2.2. Fabrico aditivo .....	18
2.2.2.1. Classificação dos processos de fabrico aditivo .....	19
2.2.2.2. Técnicas de fabrico aditivo principais na produção de estruturas <i>lattice</i> .....	22
2.2.3. Vantagens e inconvenientes gerais do processo de fabrico aditivo para o fabrico de estruturas <i>lattice</i> .....	25
2.2.3.1. Técnicas híbridas de fabricação de estruturas <i>lattice</i> metálicas devido a limitações de fabrico aditivo .....	28
2.3. Projeto mecânico: a interação entre função, material, forma e processo .....	30
3. Metodologia .....	33
3.1. Metodologia numérica .....	33
3.1.1. Fundamentos teóricos/Enquadramento .....	33
3.1.1.1. Método de Elementos Finitos .....	33
3.1.1.2. Otimização Topológica .....	35
3.1.2. Descrição do processo numérico efetuado .....	38
3.2. Metodologia de fabricação .....	54
3.2.1. Seleção das microvigas otimizadas – modelos CAD .....	54
3.2.2. Processo de fabrico dos modelos poliméricos .....	55



3.2.3.	Processo de fundição.....	58
3.2.3.1.	Formação das moldações.....	59
3.2.3.2.	Fundição das microvigas metálicas:.....	64
4.	Apresentação de Resultados.....	67
4.1.	Resultados e discussão de rotinas numéricas .....	67
4.2.	Resultados e discussão de rotinas numéricas com restrição de espessura .....	88
4.3.	Resultados da fabricação.....	102
5.	Conclusões .....	107
5.1.	Conclusões do trabalho .....	107
5.2.	Trabalhos futuros .....	109
Anexos	.....	110
Anexo A.....	.....	111
Anexo B.....	.....	116
Anexo C.....	.....	117
Anexo D .....	.....	122
Anexo E.....	.....	123
Anexo F.....	.....	128
Anexo G .....	.....	129
Anexo H .....	.....	134
Anexo I.....	.....	135
Anexo J .....	.....	140
Anexo L.....	.....	141
Anexo M.....	.....	146
Anexo N .....	.....	147
Anexo O .....	.....	152
Anexo P.....	.....	153

Anexo Q .....	158
Bibliografía .....	159

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Estruturas treliçadas metálicas, (a) Ponte Ikitsuki no Japão [1] e em (b) Torre Eiffel em Paris [2]. .....	1
Figura 1.2 - Componentes leves com estrutura treliçada para [3]: (a) Helicóptero e (b) Carro de corridas.....	2
Figura 1.3 - Publicações de literatura aberta no domínio de estruturas microreticuladas [5]. .....	2
Figura 2.1 - Esquemática das categorias de sólidos celulares [3]. .....	8
Figura 2.2 - Deformação de amostras após realização do teste de compressão [23]: (a) estrutura sólida, (b) oca e (c) <i>lattice</i> .....	9
Figura 2.3 - Simulações de elementos finitos para estimar o deslocamento de seis estruturas de malha [29]: (a) modelo 1, (b) modelo 2, (c) modelo 3, (d) modelo 4, (e) modelo 5, (f) modelo 6.....	10
Figura 2.4 - Exemplos de aplicações específicas das estruturas <i>lattice</i> [18]: (a) enrolamento de treliças helicoidais em aplicação de estruturas aeroespaciais [38], (b) estrutura de asa reforçada de veículo aéreo não tripulado [44], (c) Pá de um ventilador [46] e (d) implante biomédico [3]. .....	13
Figura 2.5 - Aplicações de estruturas <i>microlattice</i> [6]: (a) aplicação desportiva, (b) aplicação espacial, (c) aplicação motor de automóvel – pino de pistão, e (d) aplicação motor de automóvel – biela. ....	13
Figura 2.6 - Exemplos de painéis sanduíche com núcleos metálicos celulares periódicos, para o caso com estrutura central tetraédrica, piramidal e 3D <i>kagome</i> , respetivamente [55]. .....	14
Figura 2.7 - Processo de fundição por cera perdida – estrutura <i>lattice octet-truss</i> produzida com liga de alumínio fundida [57] (à esquerda) e um exemplo de um painel sanduíche de núcleo 3D <i>kagome</i> produzido a partir de liga Cu–1,8% Be [55] (à direita), respetivamente. ....	15
Figura 2.8 - Ilustração esquemática do processo <i>deformation forming</i> para a produção de estruturas <i>lattice</i> , em concreto estrutura piramidal [54]. .....	16
Figura 2.9 - Orientação de 0°/90° de um núcleo têxtil visto de frente (à esquerda) e de lado (à direita), respetivamente [55]. .....	16
Figura 2.10 - A estrutura treliça piramidal pode ser produzida cortando uma estrutura plana ( <i>plain weave fabric</i> ) e dobrando o nó na orientação de 45° [55]. .....	17
Figura 2.11 - Estrutura com micro treliças sólidas e ocas: (a) orientação quadrada (0°/90°) e (b) orientação em diamante ( $\pm 45^\circ$ ) [20]. .....	18

Figura 2.12 - Categorias de processo de fabricação aditiva com base na norma ISO/ASTM 52900. .....	19
Figura 2.13 – Exemplos de estruturas <i>lattice</i> fabricadas pelo processo de fabrico aditivo FDM: usando polímero ABS com 10 vol.% de filamento de ferrite NiZn. [84] à esquerda e, usando PLA [66]. .....	22
Figura 2.14 - Exemplos de estruturas <i>lattice</i> fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLA: arquiteturas poliméricas [86] [3]......	23
Figura 2.15 - Exemplos de estruturas <i>lattice</i> fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLS [87]. .....	24
Figura 2.16 - Exemplos de estruturas <i>lattice</i> fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLM: usando aço inoxidável 316L [89]. .....	24
Figura 2.17 - Exemplo de estrutura <i>lattice</i> fabricada pelo processo de fabrico aditivo EBM: usando em ambas a liga Ti-6Al-4V [93, 94]......	25
Figura 2.18 - Gráfico de radar do fabrico convencional vs sinterização seletiva a laser (escala 0-9, com 9 o fator mais significativo) [95]. .....	27
Figura 2.19 - Custo vs. complexidade entre fabrico aditivo e métodos convencionais [102]. .....	27
Figura 2.20 - Interação entre função, material, forma e processo, adaptado de Ashby [135]. ...	30
Figura 2.21 - Interação função, material, forma e processo, aplicado ao estudo do presente trabalho, adaptado de Ashby [135]. .....	32
Figura 3.1 - Representação de domínio e subdomínio de um problema 2D, relativamente às condições fronteira de força e deslocamento [137]. .....	33
Figura 3.2 - Projeto básico associado ao FEM [139]. .....	34
Figura 3.3 - Três tipos diferentes de otimização estrutural representados à direita [145]: a) Otimização de Tamanho; b) Otimização de Forma e em c) Otimização Topológica.....	36
Figura 3.4 - Esquematização das duas microvigas idealizadas: a da esquerda para os estudos no <i>Plain Stress</i> , estado plano de tensão, e a da direita para os estudos no <i>Plain Strain</i> , estado plano de deformação. ....	39
Figura 3.5 - Malha da microviga após refinamento de <i>element size</i> de 0,1 mm.....	41
Figura 3.6 - Zona de aplicação de restrições e carga na microviga submetida a análise estática. .....	41

Figura 3.7 – Definição das partes do sistema de otimização topológica: zona de otimização e exclusão, objetivo da otimização e tipo de resposta estabelecidas na ferramenta <i>Topology Optimization</i> do <i>Ansys</i> , submetida a análise estática. ....	42
Figura 3.8 - Excerto da configuração do <i>Ansys Workbench</i> com as rotinas de otimização realizadas e, respetiva validação na coluna mais à direita. ....	43
Figura 3.9 – Lógica de processo de otimização topológica e validação no <i>Ansys</i> . ....	43
Figura 3.10 – Detalhe dos contornos de malha efetuados no <i>software Inventor</i> da topologia de uma microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . ....	44
Figura 3.11 - Esquematização do processo necessário adotado para o reconhecimento do <i>Ansys</i> das geometrias otimizadas. ....	44
Figura 3.12 - Zona de aplicação de restrições e carga na microviga submetida a análise modal. ....	46
Figura 3.13 - Definição das partes do sistema de otimização topológica: zona de otimização e exclusão, objetivo da otimização e tipo de resposta estabelecidas na ferramenta <i>Topology Optimization</i> do <i>Ansys</i> , submetida a análise modal. ....	47
Figura 3.14 - Zona de aplicação de colocação da massa de 1 Kg na microviga submetida a análise modal. ....	48
Figura 3.15 – Detalhes da aplicação do parâmetro de restrição de fabricação do sistema de otimização topológica, à esquerda e, inclusão das arestas com restrição de 0,3 mm, à direita.....	51
Figura 3.16 - Representação das etapas da técnica de fabricação proposta: fundição por modelo perdido assistido por fabrico aditivo. ....	54
Figura 3.17 – Modelação da microviga de 5 mm otimizada com 44%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura. ....	55
Figura 3.18 - Modelação da microviga de 5 mm otimizada com 68%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.....	55
Figura 3.19 - Impressora 3D Systems FabPro1000. ....	56
Figura 3.20 - Fotos da microviga reticulada otimizada pelo método estático, obtida pelo processo de fabrico SLA, demonstrado em (a), (b), (c) e (d) e o modelo CAD tido como base em (e). ....	57
Figura 3.21 - Fotos da microviga reticulada otimizada pelo método modal, obtida pelo processo de fabrico SLA, demonstrado em (a), (b), (c) e (d) e o modelo CAD tido como base em (e). ....	58
Figura 3.22 - Balança utilizada para proceder à pesagem de cada microviga. ....	59
Figura 3.23 - Cacho com 4 ramificações produzido em PLA. ....	60

Figura 3.24 – Modelos de sacrifício: (a) união das 2 microvigas otimizadas pelo método estático ao cacho, (b) união das 2 microvigas otimizadas pelo método modal ao cacho.....	60
Figura 3.25 – Modelo de sacrifício: ramificação única de microviga otimizada pelo método modal. .....	61
Figura 3.26 - Modelos de sacrifício com os microcanais de PLA: (a) microvigas otimizadas pelo método estático, (b) microvigas otimizadas pelo método modal.....	61
Figura 3.27 - Preparação dos modelos de sacrifício antes da colocação do gesso. ....	62
Figura 3.28 - Máquina utilizada para o procedimento da mistura de água e gesso. ....	62
Figura 3.29 - Moldações com o gesso solidificado. ....	63
Figura 3.30 - Mufla utilizada para a realização do ciclo térmico do gesso. ....	63
Figura 3.31 - Ciclo térmico durante o fabrico do molde em gesso [105].....	64
Figura 3.32 – Em (a) encontram-se representadas as 5 amostras, cada uma com 15 g da liga de A356 e ligas mãe (Al5Ti1B e Al10Sr) e, em (b) vista de cima do forno de indução: colocação do cadinho, molde cerâmico e liga A356 e ligas mãe, antes de iniciar processo de fundição. ....	65
Figura 3.33 - Forno de fundição <i>Indutherm MC15+</i> . ....	66
Figura 3.34 Fundição da liga A356 e das ligas mãe. ....	66
Figura 4.1 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão. ....	67
Figura 4.2 - Topologia da microviga de 1 mm com 76%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	68
Figura 4.3 - Topologia da microviga de 1 mm com 76%, com otimização no modo Modal. ....	68
Figura 4.4 - Topologia da microviga de 1 mm com 38%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	69
Figura 4.5 - Topologia da microviga de 1 mm com 38%, com otimização no modo Modal. ....	69
Figura 4.6 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão. ....	70
Figura 4.7 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação. ....	70
Figura 4.8 - Topologia da microviga de 5 mm com 48%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	71
Figura 4.9 - Topologia da microviga de 5 mm com 53%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	72

Figura 4.10 - Topologia da microviga de 5 mm com 53%, com otimização no modo Modal. ....	72
Figura 4.11 - Topologia da microviga de 5 mm com 66%, com otimização no modo Modal. ....	72
Figura 4.12 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal. ....	73
Figura 4.13 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação. ....	73
Figura 4.14 - Topologia da microviga de 5 mm com 38%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . ....	74
Figura 4.15 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal. ....	74
Figura 4.16 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada. ....	75
Figura 4.17 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada. ....	75
Figura 4.18 - Topologia da microviga de 5 mm com 40%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada. ....	76
Figura 4.19 - Topologia da microviga de 5 mm com 30%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada. ....	76
Figura 4.20 - Topologia da microviga de 5 mm com 30%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . ....	77
Figura 4.21 - Topologia da microviga de 5 mm com 25%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada. ....	77
Figura 4.22 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal. ....	78
Figura 4.23 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 1 mm de espessura. ....	79
Figura 4.24 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . ....	80
Figura 4.25 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo Modal. ....	80
Figura 4.26 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo Modal - 1° modo de vibração. ....	81

Figura 4.27 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> - 1° modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente). .....	81
Figura 4.28 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> - 3° modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente). .....	82
Figura 4.29 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura. ....	82
Figura 4.30 - Topologia da microviga de 1 mm com 52%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	83
Figura 4.31 - Topologia da microviga de 1 mm com 52%, com otimização no modo Modal. ....	83
Figura 4.32 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura. ....	83
Figura 4.33 - Topologia da microviga de 5 mm com 81%, com otimização no modo Modal. ....	84
Figura 4.34 - Topologia da microviga de 5 mm com 57%, com otimização no modo Modal. ....	84
Figura 4.35 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> . .....	85
Figura 4.36 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal. ....	85
Figura 4.37 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal - 1° modo de vibração. ....	86
Figura 4.38 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal - 2° modo de vibração. ....	86
Figura 4.39 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> - 1° modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente). .....	86
Figura 4.40 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura. ....	87
Figura 4.41 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática, com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de espessura. ....	89
Figura 4.42 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura. ....	89
Figura 4.43 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura. ....	90
Figura 4.44 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura. ....	90



Figura 4.45 - Topologia da microviga de 5 mm com 68%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.....	91
Figura 4.46 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.....	91
Figura 4.47 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura. ....	92
Figura 4.48 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.....	92
Figura 4.49 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de espessura. ....	93
Figura 4.50 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura. ....	93
Figura 4.51 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal, com restrição de espessura.....	94
Figura 4.52 - Topologia da microviga de 5 mm com 71%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura. ....	95
Figura 4.53 - Topologia da microviga de 5 mm com 71%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.....	95
Figura 4.54 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura. ....	96
Figura 4.55 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura. ....	97
Figura 4.56 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura. ....	97
Figura 4.57 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal, com restrição de espessura.....	98
Figura 4.58 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de espessura. ....	99
Figura 4.59 Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura - 1º modo de vibração. ....	100

Figura 4.60 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura - 2º modo de vibração. ....	100
Figura 4.61 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , com restrição de espessura - 1º modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente). ....	101
Figura 4.62 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de espessura. ....	101
Figura 4.63 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método estático. ....	103
Figura 4.64 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método modal. ....	104
Figura 4.65 - Ângulos diferentes da microviga metálica otimizada pelo método modal, com ramificação única do cacho. ....	104
Figura 4.66 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método estático, com contribuição dos microcanais projetados. ....	105
Figura 4.67 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método modal, com contribuição dos microcanais projetados. ....	105
Figura A.1 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 95%. ....	111
Figura A.2 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 90%. ....	111
Figura A.3 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 85%. ....	111
Figura A.4 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 80%. ....	112
Figura A.5 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 75%. ....	112
Figura A.6 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 70%. ....	112
Figura A.7 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 65%. ....	112

Figura A.8 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 60%.	113
Figura A.9 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 55%.	113
Figura A.10 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 50%.	113
Figura A.11 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 45%.	113
Figura A.12 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 40%.	114
Figura A.13 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 35%.	114
Figura A.14 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 30%.	114
Figura A.15 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 25%.	114
Figura A.16 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 20%.	115
Figura A.17 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 15%.	115
Figura A.18 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 10%.	115
Figura A.19 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 5%.	115
Figura B.1- Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.	116
Figura B.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.	116
Figura C.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 95%.	117

Figura C.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 90%.	117
Figura C.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 85%.	117
Figura C.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 80%.	118
Figura C.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 75%.	118
Figura C.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 70%.	118
Figura C.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 65%.	118
Figura C.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 60%.	119
Figura C.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 55%.	119
Figura C.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 50%.	119
Figura C.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 45%.	119
Figura C.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 40%.	120
Figura C.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 35%.	120
Figura C.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 30%.	120
Figura C.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 25%.	120
Figura C.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 20%.	121
Figura C.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 15%.	121

Figura C.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 10%.....	121
Figura C.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> – iteração dos 5%.....	121
Figura D.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.....	122
Figura D.2- Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.....	122
Figura E.1 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 95%. .....	123
Figura E.2 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 90%. .....	123
Figura E.3 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 85%. .....	123
Figura E.4 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 80%. .....	124
Figura E.5 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 75%. .....	124
Figura E.6 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 70%. .....	124
Figura E.7 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 65%. .....	124
Figura E.8 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 60%. .....	125
Figura E.9 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 55%. .....	125
Figura E.10 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 50%. .....	125
Figura E.11 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 45%. .....	125

Figura E. 12 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 40%.....	126
Figura E.13 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 35%.....	126
Figura E.14 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 30%.....	126
Figura E.15 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 25%.....	126
Figura E.16 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 20%.....	127
Figura E.17 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 15%.....	127
Figura E.18 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 10%.....	127
Figura E.19 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 5%.....	127
Figura F.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 1 mm de espessura.....	128
Figura F.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura.....	128
Figura G.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 95%. .....	129
Figura G.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 90%. .....	129
Figura G.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 85%. .....	129
Figura G.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 80%. .....	130
Figura G.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 75%. .....	130

Figura G.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 70%.	130
Figura G.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 65%.	130
Figura G.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 60%.	131
Figura G.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 55%.	131
Figura G.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 50%.	131
Figura G.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 45%.	131
Figura G.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 40%.	132
Figura G.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 35%.	132
Figura G.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 30%.	132
Figura G.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 25%.	132
Figura G.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 20%.	133
Figura G.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 15%.	133
Figura G.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 10%.	133
Figura G.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 5%.	133
Figura H.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura.	134

Figura H.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura.....	134
Figura I.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 95%.....	135
Figura I.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 90%.....	135
Figura I.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 85%.....	135
Figura I.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 80%.....	136
Figura I.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 75%.....	136
Figura I.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 70%.....	136
Figura I.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 65%.....	136
Figura I.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 60%.....	137
Figura I.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 55%.....	137
Figura I.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 50%.....	137
Figura I.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 45%.....	137
Figura I.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 40%.....	138
Figura I.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 35%.....	138
Figura I.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 30%.....	138



Figura I.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 25%.	138
Figura I.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 20%.	139
Figura I.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 15%.	139
Figura I.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 10%.	139
Figura I.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 5%.	139
Figura J.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada.	140
Figura J.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada.	140
Figura L.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 95%.	141
Figura L.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 90%.	141
Figura L.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 85%.	141
Figura L.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 80%.	142
Figura L.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 75%.	142
Figura L.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 70%.	142
Figura L.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 65%.	142
Figura L.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 60%.	143

Figura L.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 55%.....	143
Figura L.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 50%.....	143
Figura L.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 45%.....	143
Figura L.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 40%.....	144
Figura L.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 35%.....	144
Figura L.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 30%.....	144
Figura L.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 25%.....	144
Figura L.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo <i>Static Structural</i> , c/ rest. fabrico – iteração 20%.....	145
Figura M.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de fabrico.....	146
Figura M.2 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de fabrico.....	146
Figura N.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 95%.....	147
Figura N.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 90%.....	147
Figura N.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 85%.....	147
Figura N.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 80%.....	148
Figura N.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 75%.....	148

Figura N.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 70%.....	148
Figura N.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 65%.....	148
Figura N.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 60%.....	149
Figura N.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 55%.....	149
Figura N.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 50%. .....	149
Figura N.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 45%. .....	149
Figura N.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 40%. .....	150
Figura N.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 35%. .....	150
Figura N.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 30%. .....	150
Figura N.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 25%. .....	150
Figura N.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 20%. .....	151
Figura O.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de fabrico.....	152
Figura O.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de fabrico.....	152
Figura P.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 95%. .....	153
Figura P.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 90%. .....	153

Figura P.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 85%. .....	153
Figura P.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 80%. .....	154
Figura P.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 75%. .....	154
Figura P.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 70%. .....	154
Figura P.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 65%. .....	155
Figura P.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 60%. .....	155
Figura P.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 55%. .....	155
Figura P. 10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 50%. .....	156
Figura P. 11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 45%. .....	156
Figura P.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 40%. .....	156
Figura P.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 35%. .....	157
Figura P.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 30%. .....	157
Figura P. 15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 25%. .....	157
Figura P.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 20%. .....	157
 Figura Q.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada, com restrição de fabrico. ....	 158

Figura Q.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada, com restrição de fabrico.....	158
---	-----

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas da liga A356 necessária para introduzir no <i>Ansys</i> . ....	39
--	----

# Lista de Símbolos

## Siglas, abreviaturas e acrónimos

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAD	Desenho assistido por computador
CDLP	“Continuous digital light processing”
CLIP	“Continuous liquid interface production”
DLP	“Digital light processing”
DMA	Análise Mecânica Dinâmica
DMD	“Direct metal deposition”
DMLS	“Direct metal laser sintering”
EBM	“Electron beam manufacturing”
FA	Fabrico aditivo
FDM	“Fused deposition modelling”
FEM	Modelação dos elementos finitos
IJP	“Inkjet printing”
LEDs	“Light-emitting diodes”
LOM	“Laminated object manufacturing”
LPD	“Laser powder deposition”
MJF	“Multijet fusion”
PLA	Poliácido láctico
SLA	“Stereolithography”
SLM	“Selective laser melting ”
SLS	“Selective laser sintering”
UV	Radiação Ultravioleta
2D	Dois dimensões
3D	Três dimensões

## Símbolos Romanos

$c$	Conformidade	-
$C$	Matriz de amortecimento	Ns/m
$\bar{E}$	Rigidez relativa	-
$E^*$	Módulo aparente	Pa
$f$	Vetor da carga externa	N
$\{F\}$ ou $F$	Vetor das cargas aplicadas	N
$K$ ou $[K]$	Matriz de rigidez	N/m
$m$	Massa	kg
$M$	Matriz de massa	kg
$\{x\}$ ou $x$ ou $U$	Vetor de deslocamento	m
$\dot{x}$	Vetor de velocidade	m/s
$\ddot{x}$	Vetor de aceleração	m/s <sup>2</sup>

## Símbolos Gregos

$\bar{\rho}$	Densidade relativa	-
$\rho^*$	Densidade aparente	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Densidade do material de base	kg/m <sup>3</sup>
$\phi_i$	Modos de vibração	-
$\psi_i$	Ângulo de mudança de fase	rad
$\omega_i$	Frequência natural angular	rad/s



# 1. INTRODUÇÃO

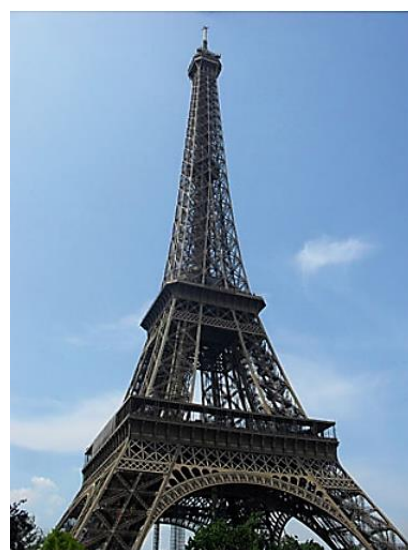
## 1.1. MOTIVAÇÃO

O conceito de estruturas reticuladas metálicas, popularizadas no século XIX, são uma forma clássica de construção. A sua capacidade de dirigir as solicitações, pela distribuição otimizada de tensões em elementos estruturais para economizar material é ainda um desafio contemporâneo. Além de serem capazes de reduzir massa, isto é, aumentar a capacidade de carga específica, são também sustentáveis devido aos materiais metálicos serem recuperáveis e recicláveis. Como tal, dado os metais serem reutilizáveis indefinidamente, a reciclagem e a recuperação são formas de tirar partido dos metais disponíveis e garantir a sustentabilidade destas construções de engenharia de macroescala.

Os novos desenvolvimentos relativos ao seu fabrico, são relacionados com o fabrico aditivo e a microfundição. Os estudos destas tecnologias de fabrico permitem a transição de estruturas de engenharia otimizada da escala macro, como por exemplo pontes (Figura 1.1), para pequenos componentes estruturais (microreticulados) (Figura 1.2).



(a)



(b)

Figura 1.1 - Estruturas treliçadas metálicas, (a) Ponte Ikitsuki no Japão [1] e em (b) Torre Eiffel em Paris [2].

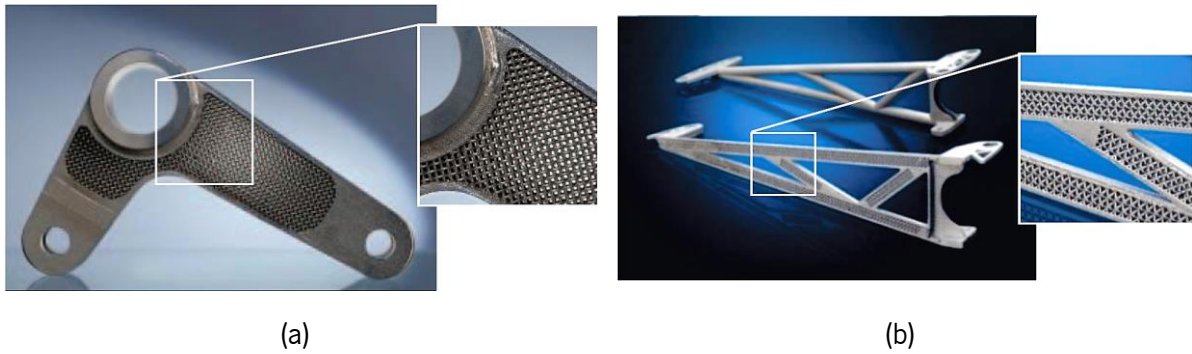


Figura 1.2 - Componentes leves com estrutura treliçada para [3]: (a) Helicóptero e (b) Carro de corridas.

Estes pequenos componentes estruturais (microreticulados) são uma solução promissora para absorver grandes quantidades de energia e podem ser utilizados para amortecer o ruído e vibrações.

As estruturas microreticuladas são assim um material muito novo que possibilita a combinação de diferentes propriedades materiais e com diferentes orientações geométricas podem alcançar melhor rigidez, resistência e boa capacidade de absorção de energia [4].

Este tipo de sólido celular tem suscitado grande interesse junto da comunidade científica e pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 1.3 pela recente vaga de publicações. Isto demonstra assim a importância do tema que tem vindo a ser desenvolvido na área, sendo um tema bastante atual com necessidade permanente de mais estudos.

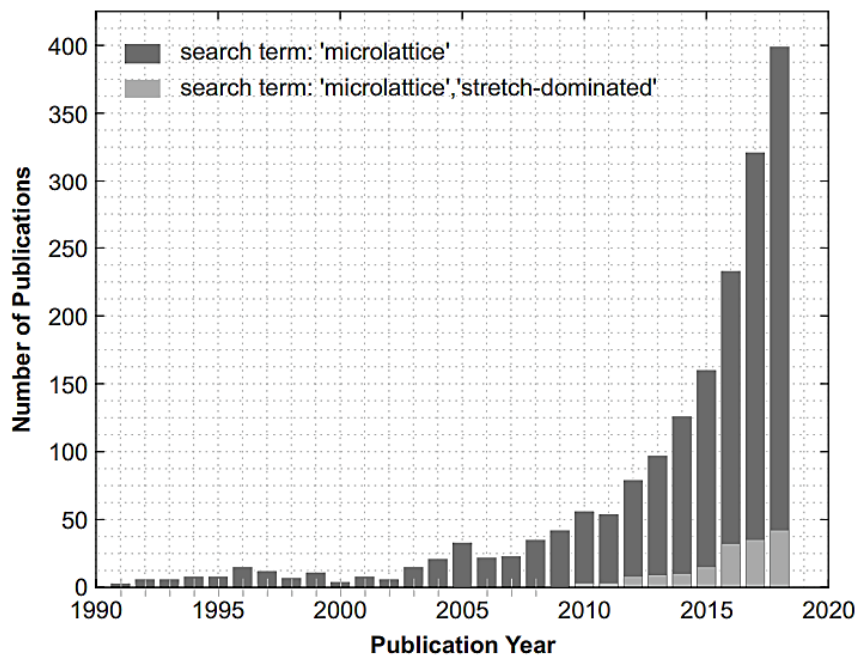


Figura 1.3 - Publicações de literatura aberta no domínio de estruturas microreticuladas [5].

Este tema tem sido assim acompanhado igualmente pelo progresso tecnológico nas suas técnicas de fabrico. Quando estas estruturas microreticuladas são fabricados por fabrico aditivo, estas estruturas tendem a ter uma elevada resistência mecânica, contudo a sua capacidade de amortecimento é baixa. Pela técnica da microfundição é possível obter microestruturas com maior capacidade de amortecimento e variação de propriedades.

Também o uso de ferramentas de análise de elementos finitos, permite a otimização das topologias de microreticulados para ampliar a sua capacidade de carga e amortecimento, permitindo otimizar o comportamento mecânico.

Diversos estudos têm sido efetuados em abordagens de microreticulados 3D com periodicidade na geometria da célula unitária com topologia, por exemplo, tetraédrica, octaédrica, etc e, otimização de diversas propriedades associadas às suas células unitárias. Para além das microestruturas tridimensionais também os componentes bidimensionais têm sido levemente abordados, similarmente com repetibilidade da célula unitária no espaço bidimensional.

No entanto, o estudo de microreticulados 2D é um tema que pode ser mais aprofundado, ainda para mais com células unitárias não periódicas com geometria obtida diretamente a partir da ferramenta *Topology Optimization*. Desta forma, é assim proposto o uso desta ferramenta para a obtenção das microestruturas reticuladas 2D, sendo este método notável para compreender como conseguir criar uma microestrutura suficientemente resistente com orientações inteligentes do material, potenciando as propriedades desejadas com a menor quantidade de material possível. Além do mais, tal como já se referiu, torna-se relevante estes estudos de otimizações com reforços bidimensionais dado ser algo não tão abordado e aprofundado e, que pode ser igualmente útil aquando da necessidade de um reforço bidimensional de uma microestrutura.

De notar que este trabalho com recurso à ferramenta *Topology Optimization* é então realizado com a abordagem 2D em detrimento da abordagem 3D, que também poderia ser adotada e seria igualmente desafiante e diferente dos modelos mais habituais de estudos de estruturas microreticuladas 3D com repetição da célula unitária nos três eixos principais.

No entanto, o estudo 2D foi selecionado pelas razões já acima mencionadas e, de maneira a permitir também aliar a simplicidade e a redução de tempo computacional dado os inúmeros estudos numéricos ambicionados realizar. Pretende-se assim com estes estudos perceber de que forma se organizarão as zonas reticuladas, ao invés do que já se fez e viu em diversos estudos concretizados com periodicidade da célula unitária numa estrutura reticulada 2D.

Como tal, usando abordagens estruturais estáticas e dinâmicas, este trabalho explora assim a combinação de otimização topológica e microfundição para obter microvigas reticuladas com topologia e microestrutura otimizadas para promover resistência mecânica e amortecimento.

## **1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho sugerido para a presente dissertação tem como objetivos principais gerar geometrias de microvigas reticuladas 2D por otimização topológica para aumentar a sua resistência mecânica e amortecimento. Desta forma, tem-se em vista produzir microvigas reticuladas (*microlattice beams*), não só para função estrutural, mas também para absorção de vibrações.

Esta dissertação é caracterizada assim por dois objetivos fundamentais, descritos em seguida.

O primeiro objetivo é o estudo numérico em torno da obtenção das microvigas reticulas. Pretende-se assim submeter duas microvigas de espessuras diferentes a rotinas de otimização topológica com o objetivo de reduzir a massa da viga e ver como varia a sua rigidez, de forma a encontrar um ponto ótimo onde se consegue ter o compromisso entre rigidez e massa. Como tal, pretende-se utilizar a ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys* em dois modos: o *Static Structural* e o Modal, para comparar as formas das microvigas reticuladas resultantes dos dois métodos, de maneira a averiguar qual o melhor método de otimização para um estudo estático e modal, e, ainda, através destes estudos selecionar as formas mais promissoras para produção.

O segundo objetivo está associado à fabricação. Ou seja, elegidas as formas das microvigas reticuladas, pretende-se fabricar os modelos físicos das microvigas otimizadas através do auxílio do fabrico aditivo para produção dos modelos aliado com a microfundição para propiciar uma microestrutura benéfica para promover resistência mecânica e amortecimento.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

No capítulo inicial, foram tecidas algumas considerações de modo a contextualizar o tema abordado e a sua pertinência de investigação. Além disso foram também especificados os seus objetivos.

No segundo capítulo é apresentado um estado da arte do tema. É feita uma introdução histórica ao problema, onde se apresenta o conceito de estruturas *lattice*, as suas propriedades e aplicações em diversos ramos, de forma a perceber a sua importância na atualidade e a necessidade de constantes desenvolvimentos nesta área. Em seguida, é abordada a questão da fabricação deste tipo de estruturas, referindo-se o fabrico convencional e o aditivo, apresentando vantagens e desvantagens de cada um, consumando que o ideal para este tipo de estruturas é recorrer a uma técnica híbrida de fabricação. É ainda demonstrada a conceção fundamental de um sistema mecânico com as suas quatro áreas de

função, forma, processo e material, sendo bastante pertinente a presença destes conceitos, uma vez que se pretende fabricar uma estrutura e, como tal, é importante perceber estas interações.

Quanto ao terceiro capítulo, este é um capítulo relevante dado ser nele em que se encontram as metodologias numéricas e de fabricação utilizadas para a obtenção das microvigas reticuladas. No que concerne à metodologia numérica, é feito previamente e de forma sucinta um pequeno enquadramento do método de elementos finitos e da ferramenta *Topology Optimization* dada a relevância e utilidade para o presente trabalho. Após isto, é feita a descrição de todo o processo numérico efetuado onde são apresentados os estudos numéricos realizados das duas geometrias de microvigas visadas a otimizar. É ainda demonstrada a necessidade de recorrer à ferramenta *Topology Optimization* nos dois modos, *Static Structural* e Modal, sendo apresentadas as rotinas de otimização efetuadas de forma a reduzir a massa e avaliar como varia a rigidez das estruturas aquando deste processo de obtenção de estruturas reticuladas e, de que forma, foi possível validar e examinar os valores de rigidez estática e dinâmica, para os estudos estáticos e dinâmicos, respetivamente.

Já no que diz respeito à metodologia de fabricação, é descrito todo o processo utilizado para a produção das microvigas recorrendo à técnica de fundição do modelo perdido assistido pelo fabrico aditivo, passando pela seleção das microvigas pretendidas fabricar, o processo de fabrico dos modelos poliméricos e o processo de fundição em si.

O quarto capítulo é certamente o mais interessante, pois é neste onde são apresentados todos os resultados e análises, numéricas e de fabricação. No primeiro subcapítulo e, dada a realização da otimização topológica nos dois modos, *Static Structural* e Modal, foram comparadas as formas resultantes dos dois métodos dado que as respostas obtidas foram diferentes.

Desta forma, esta análise possibilitou a análise dos diferentes métodos de otimização, a abordagem estática e modal. Para tal, construíram-se os gráficos referentes aos valores alcançados de rigidez estática e dinâmica para os casos das microvigas com 1 e 5 mm de espessura, onde foram detalhados os comportamentos das linhas dos seus gráficos justificando com topologias de microvigas reticuladas obtidas. No segundo subcapítulo, uma vez o surgimento da necessidade de restringir a espessura, motivou a necessidade de fazer exatamente o mesmo tipo de análises que as realizadas no subcapítulo anterior aos gráficos obtidos, mas agora com topologias microreticuladas obtidas com restrição de fabricação. Já no terceiro subcapítulo, são apresentadas as microvigas produzidas através de três técnicas diferentes e, onde são tecidas algumas anotações acerca da técnica de fabrico utilizada.

No quinto, e último capítulo, são tecidas algumas considerações acerca das conclusões retiradas ao longo deste trabalho. Além disso, são feitas algumas sugestões sobre possíveis trabalhos futuros, para a continuação do desenvolvimento desta dissertação.

## 2. ESTADO DE ARTE

As estruturas reticuladas são uma forma clássica de construção e têm desde cedo suscitado interesse junto da comunidade científica, não apenas numa escala macro como também em pequenos componentes estruturais. Assim, pretende-se neste capítulo dar a conhecer um pouco destas microestruturas reticuladas, compreender as suas propriedades mecânicas e aplicações nas diversas áreas. Para além disso, torna-se pertinente analisar os desenvolvimentos relativos aos métodos de fabrico destas estruturas, quer por métodos convencionais, quer através do fabrico aditivo e, ainda, compreender a interação da forma, função, material e processo de fabrico para o projeto e fabricação de uma estrutura *lattice*.

### 2.1. ESTRUTURAS *LATTICE*

Os materiais celulares são porosos em comparação com um material sólido permitindo-lhes possuir melhores características funcionais [6]. Como tal, os sólidos celulares são uma classe de materiais que tem despertado interesse e curiosidade no seu estudo dentro da comunidade científica.

Gibson define os materiais celulares como sendo "uma rede interligada de escoras ou placas" [7]. Dada a sua configuração de vigas/colunas interligadas, estas estruturas revelam alta resistência mecânica específica e uma baixa densidade [8].

A densidade relativa é a característica mais crítica do sólido celular e é definida como a relação estabelecida entre a densidade do material celular e do material sólido a partir do qual o material celular é feito [9]. A estrutura celular pode ser então definida pela sua densidade relativa, tamanho da célula unitária e espessura da parede, regularidade/repetição, conectividade das células unitárias e o material de que são feitas [10].

Ashby afirma ainda que os materiais *lattice*, uma forma de material celular, diferem das estruturas *lattice* de engenharia de grande escala, num aspeto importante que é o da escala. A célula unitária de materiais *lattice* é de milímetros ou micrómetros, e como tal isto "permite que sejam vistos tanto como estruturas ou materiais" [11]. Portanto, por um lado podem ser analisadas utilizando métodos clássicos da mecânica, tal como qualquer estrutura é analisada, mas por outro lado, também conhecido como um "material" por direito próprio, com o seu próprio conjunto de propriedades efetivas [12].

Antes do surgimento da estrutura *lattice*, como eram materiais porosos, o nome de estrutura celular era o mais difundido. O conceito de "estrutura celular" foi originalmente proposto por Gibson e

Ashby, Evans e Hutchinson [7, 9, 13]. Gibson e Ashby consideraram que a estrutura celular incluía espumas (espumas de célula aberta e de célula fechada), e estruturas em favos de mel [7, 9]. Contudo, a estrutura *lattice* como outro tipo de material sólido celular é diferente das espumas e das estruturas em favos de mel, sendo que a diferença de estrutura reside principalmente na topologia e escala da célula unitária, e nas propriedades [11, 14].

A estrutura *lattice* é então uma estrutura porosa formada pelo arranjo de células unitárias onde os seus padrões influenciam o desempenho mecânico da estrutura. Estas estruturas oferecem grandes oportunidades providenciando estruturas de alta resistência e leves em comparação com estruturas sólidas [15].

Existem assim estruturas *lattice* bidimensionais e tridimensionais, e estão frequentemente associadas a sólidos celulares [9]. Na Figura 2.1 encontra-se então esquematizado um resumo do que pode ser considerado como um sólido celular.

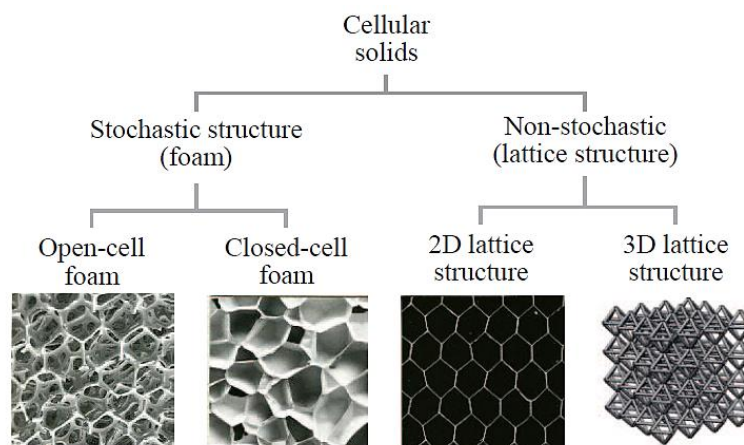


Figura 2.1 - Esquematização das categorias de sólidos celulares [3].

As estruturas *lattice* têm muitas propriedades superiores que as espumas e as estruturas em favos de mel não obtêm devido à propriedade única de possibilitar a customização. Ou seja, cada célula unitária, e até mesmo cada escora da estrutura *lattice* pode ser definida como a variável de projeto e ser otimizada para satisfazer requisitos específicos personalizados, o que significa que as propriedades mecânicas das *lattice* são mais flexíveis de controlar do que as espumas e estruturas favos de mel [16, 17]. Por conseguinte, pode concluir-se que as estruturas *lattice* têm melhor desempenho do que as estruturas de espuma e em favos de mel [18].

As estruturas *lattice* são então uma classe importante dos materiais celulares, que possuem a vantagem de uma topologia simples ser capaz de proporcionar respostas funcionais, juntamente com um excelente comportamento estrutural [19].



### 2.1.1. PROPRIEDADES DAS ESTRUTURAS *LATTICE*

As estruturas *lattice* possuem muitas propriedades relativas superiores tornando este tipo de estrutura uma solução promissora para diversas aplicações, como por exemplo uma estrutura leve devido à sua alta rigidez e resistência específicas, um absorvedor de energia devido à sua capacidade de sofrer grandes deformações com uma tensão aparente relativamente baixa, um permutador de calor devido à sua grande área superficial, e um isolante acústico devido ao seu grande número de poros internos [3].

É assim do conhecimento geral que a estrutura *lattice* apresenta boas propriedades mecânicas e, algumas dessas propriedades são seguidamente descritas e analisadas.

Uma das propriedades diz então respeito à alta resistência e rigidez [18, 20-23]. Um exemplo concreto para legitimar estas propriedades remete a um estudo realizado por Mahshid *et al.* [23] em que fabricaram amostras de estruturas incluindo estruturas sólidas, ocas e treliçadas, e compararam a resistência das estruturas através da realização de um teste de compressão. A deformação das amostras após o teste de compressão encontra-se na Figura 2.2.

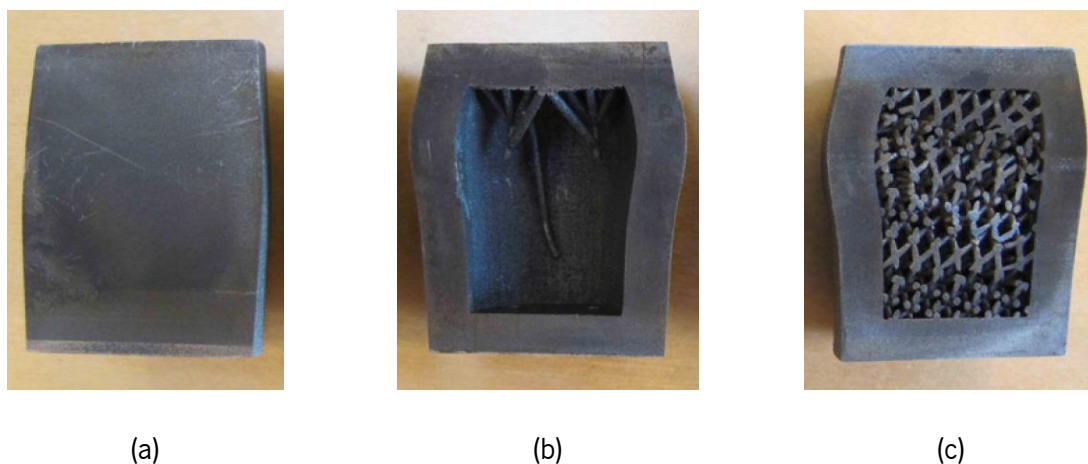


Figura 2.2 - Deformação de amostras após realização do teste de compressão [23]: (a) estrutura sólida, (b) oca e (c) *lattice*.

Os resultados do estudo indicaram que, embora a resistência da estrutura sólida tenha obtido um valor superior ao da estrutura *lattice*, ainda assim o valor obtido de resistência da estrutura *lattice* foi satisfatório, conseguindo-se assim reduzir a quantidade de material a usar e, obter uma estrutura mais leve.

Outra propriedade associada às estruturas *lattice* é relativa à capacidade de absorção de energia [24-27]. Por exemplo, uma investigação efetuada por Ozdemir *et al.* [26] em que realizaram análises de testes quasi-estáticos em estruturas treliçadas com células de geometria cúbica, em forma de diamante e reentrantes. Propuseram assim estudar o comportamento da deformação de carga dinâmica das estruturas *lattice*, incluindo o processo de falha e a resposta de tensão-deformação. Sob a condição de

baixa velocidade e ainda colisão a alta velocidade, o que se verificou é que as estruturas treliçadas mostraram diferenças óbvias no comportamento de deformação sendo que apresentaram efeito de absorção de energia [18].

Para além das duas propriedades acima referidas, pode referir-se ainda o alto amortecimento [28-30] observado em estruturas *lattice*. Um exemplo concreto que permite legitimar esta propriedade remete a um estudo realizado por Syam *et al.* [29] em que projetaram seis estruturas *lattice* diferentes, de forma a investigar o amortecimento e isolamento de vibrações, tendo recorrido à simulação por elementos finitos para analisar o deslocamento das seis estruturas sob a mesma condição de carga. Os resultados mostraram que as estruturas treliçadas do modelo 2, modelo 3, e modelo 5 tiveram um forte efeito de amortecimento e isolamento de vibração, tal como se encontra evidenciado na Figura 2.3. Estes estudos fornecem assim uma boa base teórica para justificar a aplicação de estruturas treliçadas em situações que se requer amortecimento e ainda isolamento de vibrações.

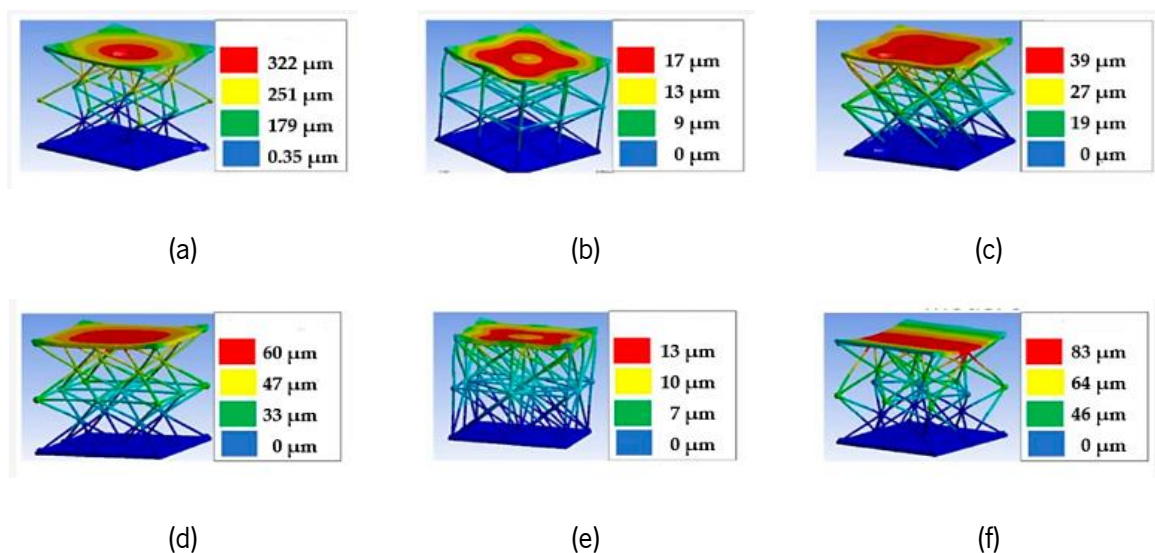


Figura 2.3 - Simulações da elementos finitos para estimar o deslocamento de seis estruturas de malha [29]: (a) modelo 1, (b) modelo 2, (c) modelo 3, (d) modelo 4, (e) modelo 5, (f) modelo 6.

Além das propriedades já mencionadas, pode destacar-se ainda a dissipação de calor das estruturas *lattice*. Diversos estudos têm sido realizados e permitido avaliar a eficiência da dissipação. Por exemplo, Fink *et al.* [31] e Do *et al.* [32] estudaram a dinâmica do fluxo de fluidos através de estruturas treliçadas em microescala, e verificaram e estudaram a troca de calor e o desempenho da transferência de calor da estrutura *lattice*.

Após a melhor compressão das propriedades é importante notar que, a rigidez e resistência destes materiais dependem da densidade relativa, do rácio da geometria da escora (raio/comprimento), da

configuração geométrica da célula unitária, do tamanho da célula unitária e, das propriedades do material original [11].

Gibson e Ashby [9] demonstraram ainda que, as propriedades mecânicas das estruturas treliçadas dependem significativamente da densidade relativa, sendo que esta é a densidade de toda a estrutura *lattice* em comparação com a do material original. Assim, as características estruturais que se destacam de um sólido celular são a densidade relativa e a rigidez relativa [9, 33].

No que diz respeito à densidade relativa,  $\bar{\rho}$ , esta é a razão entre a densidade do material celular,  $\rho^*$ , e a densidade do material de base,  $\rho_S$ , e é descrita na Equação (2.1) como [9]:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_S} \quad (2.1)$$

No que concerne à rigidez relativa,  $\bar{E}$ , esta é calculada na Equação (2.2) da seguinte forma:

$$\bar{E} = \frac{E^*}{\bar{\rho}} \quad (2.2)$$

Onde  $E^*$  é o módulo de *Young* da *lattice*, ou seja, assume-se a estrutura *lattice* como se fosse um corpo completo não ligando à porosidade e, calcula-se assim o módulo da *lattice* que é diferente do módulo do material que compõe a estrutura *lattice*.

De referir que, a propriedade mais crucial das estruturas celulares é então a densidade relativa, sendo que esta é um parâmetro que é normalmente utilizado para determinar a maioria das propriedades mecânicas das estruturas celulares, incluindo o seu módulo de elasticidade, tensão de cedência, módulo de corte, condutividade do calor e permeabilidade [34]. Ou seja, estas propriedades podem ser descritas como funções da densidade relativa, tal como se fez na Equação (2.2), para o caso do módulo de elasticidade.

Portanto devido às características já mencionadas, a estrutura *lattice* possui assim muitas propriedades superiores às de um material sólido e de estruturas convencionais, sendo capaz de integrar mais do que uma função numa parte física, o que a torna atrativa numa vasta gama de aplicações [3].

### 2.1.2. APLICAÇÕES DAS ESTRUTURAS *LATTICE*

O principal benefício da estrutura celular é colocar materiais apenas onde estes são necessários para uma determinada aplicação [10]. A conceção e o fabrico de estruturas celulares estão a esforçar-se pelo desejo e interesse de poupar os materiais funcionais dispendiosos, construir tempo e oferecer um alto desempenho, alto rácio de rigidez/peso [8, 9, 35], excelentes características de absorção de energia

[36] e, propriedades significativas de isolamento acústico e térmico para estruturas aeroespaciais, peças de automóveis e produtos médicos e de engenharia [10].

Assim, as excelentes propriedades das estruturas *lattice* acabam por preencher o vazio da indústria de fabrico e proporcionam oportunidades sem precedentes para estruturas com melhor desempenho de fabrico [18].

Devido às propriedades das estruturas *lattice*, estas são aplicadas em vastos campos de aplicação [18]. As estruturas *lattice* têm elevada condutividade térmica e elétrica, são altamente estruturadas e podem suportar altas temperaturas [37]. Para além disso, tendo em consideração o facto de serem estruturas leves e de elevada resistência são frequentemente utilizadas no projeto estrutural de aeronaves, foguetes e outros campos aeroespaciais, como satélites, telescópios espaciais e aviões [38-43] e no campo automotivo [44-46].

Estas estruturas têm também, como já referido, o potencial de absorver uma maior quantidade de energia [25], sendo como tal, adequadas para utilização em dispositivos de armazenamento de energia em forma de mola devido à capacidade de voltar ao estado original após serem comprimidos [37]. De referir que, a indústria automóvel e aeroespacial recorrendo à utilização destas estruturas pode beneficiar muito com a recuperação da forma em cenários de impacto e, para além disso, ser mais leve do que os materiais atualmente utilizados [37].

Além disso, as estruturas *lattice* têm biocompatibilidade e alta resistência, que podem ser concebidas na forma de tecido humano e osso para substituir órgãos doentes [18]. Como tal, têm sido muito utilizadas no campo médico tendo em consideração as suas propriedades mecânicas flexíveis e características estruturais que permitem satisfazer requisitos específicos [47-53]. Na Figura 2.4 estão então representadas algumas das aplicações específicas das estruturas *lattice*, referidas anteriormente.

Outras aplicações, mais à escala micro, dizem respeito ao emprego das estruturas de *microlattice* num capacete desportivo onde a estrutura *microlattice* é inserida entre a camada superior e inferior construindo assim uma estrutura *sandwich*. Outras utilizações são o emprego numa nave espacial, num pino de pistão de motor a gasolina e, ainda na biela de um motor, que são mostradas na Figura 2.5.

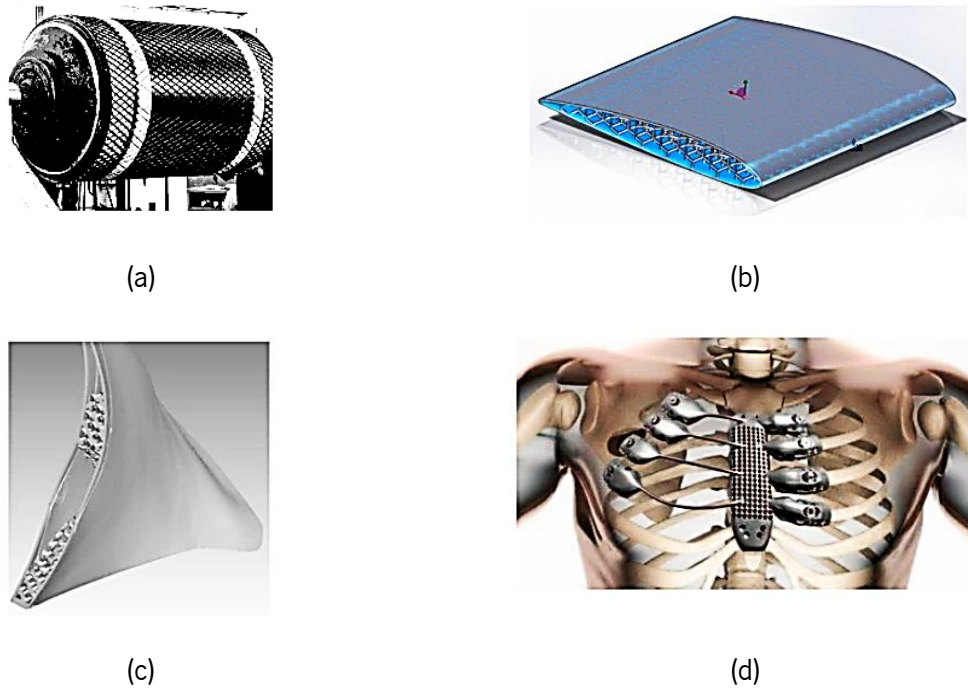


Figura 2.4 - Exemplos de aplicações específicas das estruturas *lattice* [18]: (a) enrolamento de treliças helicoidais em aplicação de estruturas aeroespaciais [38], (b) estrutura de asa reforçada de veículo aéreo não tripulado [44], (c) Pá de um ventilador [46] e (d) implante biomédico [3].

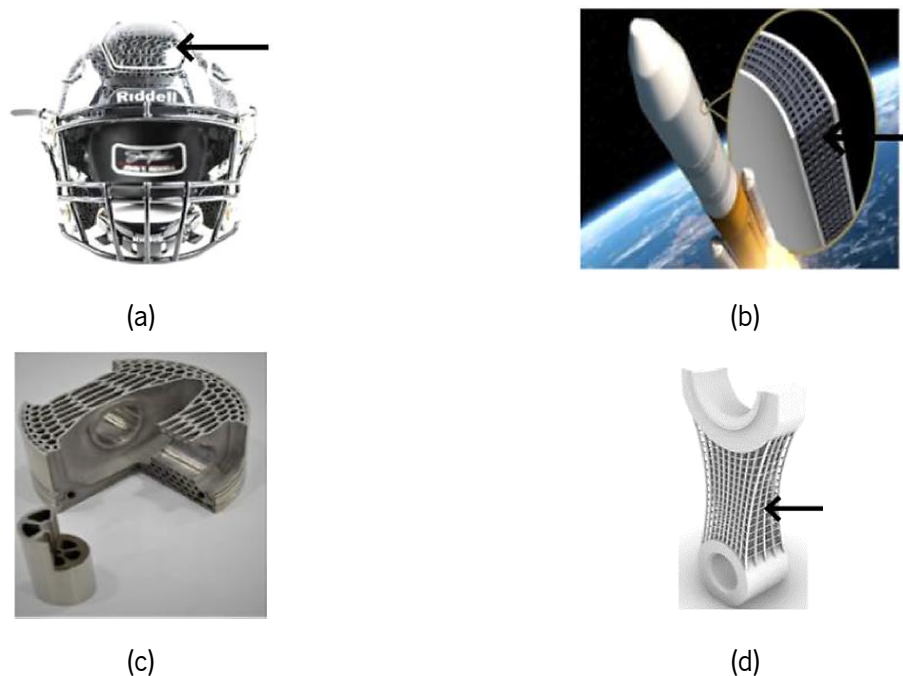


Figura 2.5 - Aplicações de estruturas *microlattice* [6]: (a) aplicação desportiva, (b) aplicação espacial, (c) aplicação motor de automóvel – pino de pistão, e (d) aplicação motor de automóvel – biela.

## 2.2. FABRICAÇÃO DAS MICROESTRUTURAS RETICULADAS (*MICROLATTICE*)

No que concerne à fabricação das microestruturas reticuladas, nos últimos anos, inúmeros pesquisadores utilizaram diversas técnicas de fabricação para o desenvolvimento destas microestruturas reticuladas usando metal e polímeros.

As duas principais categorias de processos de fabrico de estruturas *microlattice* são os métodos convencionais e avançados.

### 2.2.1. FABRICO CONVENCIONAL

As estruturas *microlattice* podem ser fabricadas por uma variedade de meios incluindo técnicas de fabrico convencional. Algumas técnicas convencionais empregues por investigadores foram o processo de fundição por cera perdida, *deformation forming* [54] e os métodos *metal wire approaches* [55] e, como tal, serão analisadas no presente trabalho.

O processo de fundição por cera perdida é um dos métodos convencionais para criar estruturas celulares onde os moldes eram produzidos a partir de uma cera ou polímero volátil, como poliuretano. Os conjuntos de moldes eram imersos num banho de pasta cerâmica, o que gerava um revestimento cerâmico sobre o molde. Depois disso, os moldes eram secos, e concluída esta etapa de secagem, a descerificação era feita por fusão ou volatilização e, em seguida, o material da estrutura reticulada era produzido preenchendo o molde vazio com metal líquido. Após o vazamento e arrefecimento dos fundidos, o produto final era obtido através da remoção do revestimento cerâmico [6, 37]. Há assim, uma gama de topologias celulares possíveis de produzir com este método como a piramidal, a tetraédrica e a 3D *kagome* [55], tal como se encontram representadas na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Exemplos de painéis sanduíche com núcleos metálicos celulares periódicos, para o caso com estrutura central tetraédrica, piramidal e 3D *kagome*, respetivamente [55].

Com esta abordagem é possível o fabrico de formas complexas não planas, com treliças que apresentam uma elevada conectividade nodal [37].

No entanto, é difícil fabricar estruturas com núcleos de densidade relativa baixa, quase ideais, devido aos caminhos de metal nos moldes serem demasiado pequenos e complexos e, posteriormente,

sofrerem com uma maior suscetibilidade a defeitos de fundição [37, 55]. Devem desta forma ser utilizadas ligas de alta fluidez, o que acaba por limitar a escolha do material e este processo apresentar limitações na utilização de ligas [6, 37, 55].

Deshpande e Fleck [56] produziram vigas sanduíche de alumínio/silício e silício/ latão com núcleos tetraédricos e Deshpande et al. [57] fabricaram uma estrutura *lattice octet-truss* a partir de liga de alumínio, representada na Figura 2.7, ambos utilizando o processo tradicional de fundição por cera perdida com pré-formas de poliestireno moldado por injeção. Wadley et al. [55] e Wang et al. [58] usaram um protótipo rápido feito a partir de *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) para produzir um molde para o processo de fundição por cera perdida utilizando uma liga Cu-Be, apresentada também na Figura 2.7.

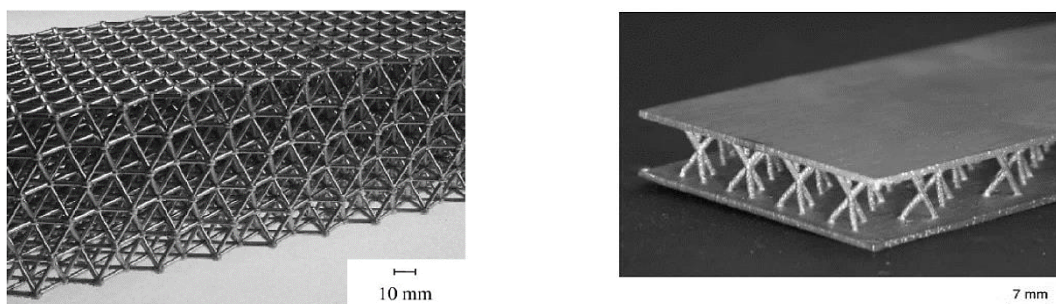


Figura 2.7 - Processo de fundição por cera perdida – estrutura *lattice octet-truss* produzida com liga de alumínio fundida [57] (à esquerda) e um exemplo de um painel sanduíche de núcleo 3D *kagome* produzido a partir de liga Cu-1,8% Be [55] (à direita), respetivamente.

Outro método de produção de estruturas *lattice*, periódicas e de células abertas, é o processo *deformation forming*. Usando este processo, podem obter-se células com tamanhos desde milímetros até vários centímetros [37, 55].

Tal como evidenciado na Figura 2.8, o processo inicia com a laminagem da chapa metálica até um perfurador de maneira a produzir furos hexagonais ou em forma de diamante. Em seguida, as chapas produzidas com os furos são perfuradas com punção em regiões predefinidas para transformar as chapas em estruturas piramidais ou tetraédricas. Como requerido pela maioria dos processos de deformação, as estruturas produzidas requerem recozimento, para suavizar o material e levá-lo para o seu estado de equilíbrio, e sofrem de uma utilização ineficiente dos materiais [37, 55]. As estruturas *lattice* produzidas por este processo são relatadas como tendo melhor ductilidade do que as produzidas com fundição por cera perdida [55].

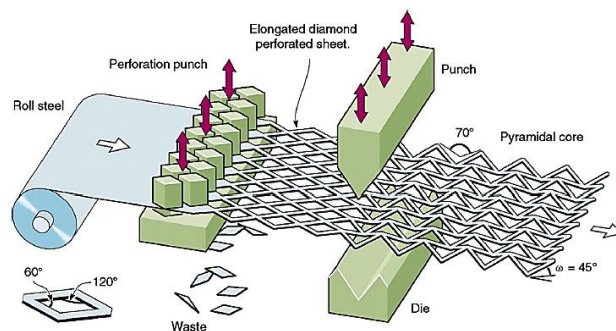


Figura 2.8 - Ilustração esquemática do processo *deformation forming* para a produção de estruturas *lattice*, em concreto estrutura piramidal [54].

Uma outra forma de fabrico, é a metodologia de arame metálico (*metal wire approaches*), podendo esta ser dividida em duas, a *woven metal textiles* e a *non-woven metal textiles*.

A *woven metal textiles* é uma tecnologia têxtil metálica bem desenvolvida. A tecelagem, o trançado e a costura asseguram métodos simples e baratos para conseguir controlar as posições desejadas [55]. Estas abordagens são aplicáveis a qualquer liga que possa ser trefilada, isto é, exequível de fabricar arames. A abordagem têxtil do tecido metálico permite assim produzir estruturas de célula aberta [37]. A orientação do arame é possível ser disposta em qualquer ângulo, servindo de exemplo a Figura 2.9 que mostra a orientação 0°/90°.

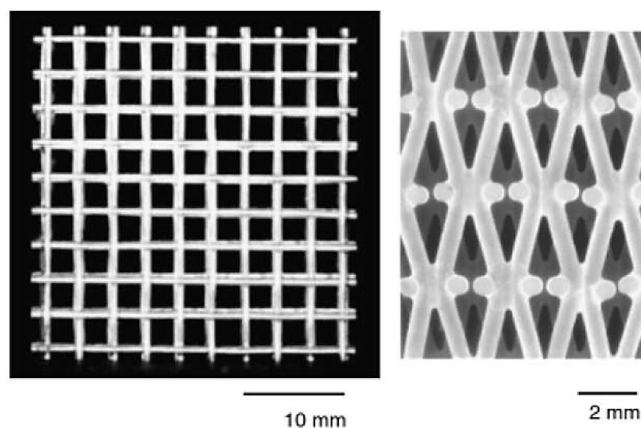


Figura 2.9 - Orientação de 0°/90° de um núcleo têxtil visto de frente (à esquerda) e de lado (à direita), respetivamente [55].

Já a Figura 2.10 mostra a orientação a 45° onde a estrutura plana (*plain weave*) e a estrutura de treliça piramidal são mostradas na parte de cima e de baixo, respetivamente. De notar que, estando a estas estruturas associadas ao fenómeno *crimp*, a aplicação de pré-carga, necessária para aliviar o *crimp* e garantir a linearidade, providencia um método conveniente para o controlo preciso do tamanho da célula, especialmente em baixa densidade relativa e para fazer uma pré-forma para a estrutura piramidal [55].



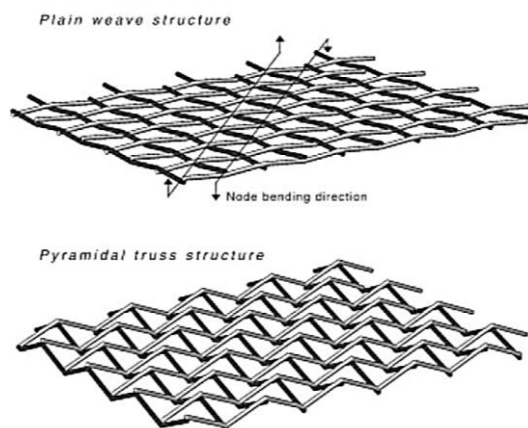


Figura 2.10 - A estrutura treliça piramidal pode ser produzida cortando uma estrutura plana (*plain weave fabric*) e dobrando o nó na orientação de  $45^\circ$  [55].

De referir que, os usos multifuncionais são limitados, uma vez que os fios não são unidos na prática normal. No entanto, este processo oferece uma série de opções, dado que praticamente todos os metais podem ser utilizados para produzir arames e variedade de arranjos de treliça disponíveis [59]. De notar que através deste método podem ser alcançadas densidades relativas de cerca de 10% [20].

A última técnica de fabrico abordada no presente trabalho, diz respeito então à *non-woven metal textiles*. Esta técnica produz estruturas por camadas de arame e tubos feitos de metal, como por exemplo de aço inoxidável e, subsequentemente unidos pela técnica de brasagem [20]. Recorrendo à utilização deste método podem ser produzidas estruturas de células quadradas e em forma de diamante com densidades relativas entre 3% e 23%. As estruturas podem ser processadas posteriormente, dobrando as camadas para formar estruturas piramidais [37].

De notar que, em relação à técnica anterior abordada, nesta é mais simples manter o alinhamento celular em toda a estrutura e menos material é desperdiçado (por corte). Além disso, o fenómeno *crimp* que afeta a produção das estruturas na técnica anterior, através deste processo de fabrico, a pré-carga necessária para aliviar o *crimp* não é necessária para obter núcleos de muito baixa densidade. Todos estes benefícios reduzem o custo final [55].

Exemplos de estruturas treliçadas com treliças sólidas e ocas e células orientadas tanto na orientação quadrada ( $0^\circ/90^\circ$ ) como em diamante ( $\pm 45^\circ$ ) encontram-se apresentadas na Figura 2.11.

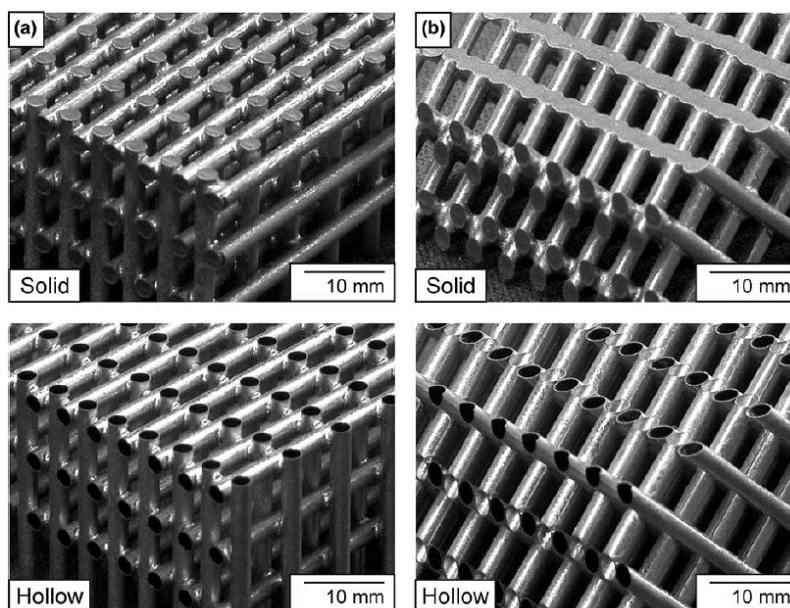


Figura 2.11 - Estrutura com micro treliças sólidas e ocas: (a) orientação quadrada ( $0^\circ/90^\circ$ ) e (b) orientação em diamante ( $\pm 45^\circ$ ) [20].

Tal como é possível constatar pelo que foi acima abordado, várias técnicas convencionais de fabrico foram desenvolvidas para a fabricação de estruturas *lattice*. No entanto, estes processos dependem de aparelhos complicados com um controlo de processo preciso e requerem etapas adicionais de montagem ou ligação para criar as estruturas desejadas e, além disso, as arquiteturas possíveis de fabricar são limitadas ao usar estes processos [3]. Ou seja, os métodos de fabrico convencional apresentam restrições aparentes na fabricação de estruturas complexas destacando-se duas desvantagens principais: a estrutura estocástica e a limitação da arquitetura, como já foi referido [60]. Por um lado, devido aos poros e espessuras de parede imprecisamente descontrolados, as estruturas celulares estocásticas têm desempenhos instáveis. Por outro lado, as estruturas não estocásticas produzidas por métodos de fabrico convencionais requerem geralmente mais etapas de montagem ou colagem, o que complica e dificulta o fabrico de estruturas celulares, limitando assim a disponibilidade de tipos de arquiteturas [60].

### 2.2.2. FABRICO ADITIVO

Para além dos métodos convencionais acima discutidos para a produção de estruturas *lattice* os investigadores descobriram que, com a ajuda do fabrico aditivo poderiam ser fabricadas topologias complexas de estruturas *lattice*. As capacidades que a tecnologia de fabrico aditivo possui tornam-na bem adequada para o fabrico de peças com estruturas *lattice*. Vários processos de fabrico aditivo (FA) foram implantados para a fabricação de estruturas treliçadas e a sua fabricação foi investigada [3].

Assim, em oposição aos métodos convencionais de processamento, o fabrico aditivo é baseada numa produção incremental camada por camada [61].

O fabrico aditivo como tecnologia disruptiva é uma das tecnologias de fabrico mais promissoras [62]. O seu processo é definido como o “processo de unir materiais para produzir objetos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição aos métodos de fabricação subtrativos” [63].

#### 2.2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICO ADITIVO

Enquadrados nas tecnologias de fabrico aditivo há uma série de processos. Assim, de acordo com a norma ISO/ASTM 52900-15, esta classifica e divide em sete grupos diferentes os processos que um sistema de fabrico aditivo pode implementar para impressão 3D, sendo eles: extrusão de material (*Material extrusion*), jato de material (*Material jetting*), jato de ligantes (*Binder jetting*), fusão em leito de pó (*Powder bed fusion*), laminação de chapas (*Sheet lamination*), deposição com energia direcionada (*Direct energy deposition*) e, ainda, fotopolimerização (*Vat photopolymerization*), representados na Figura 2.12 [63]. Estes variam e diferenciam-se de acordo com o material, o processo utilizado, na forma final consoante a forma geométrica necessária e o acabamento superficial. De notar que cada grupo/categoria tem alguns processos específicos.

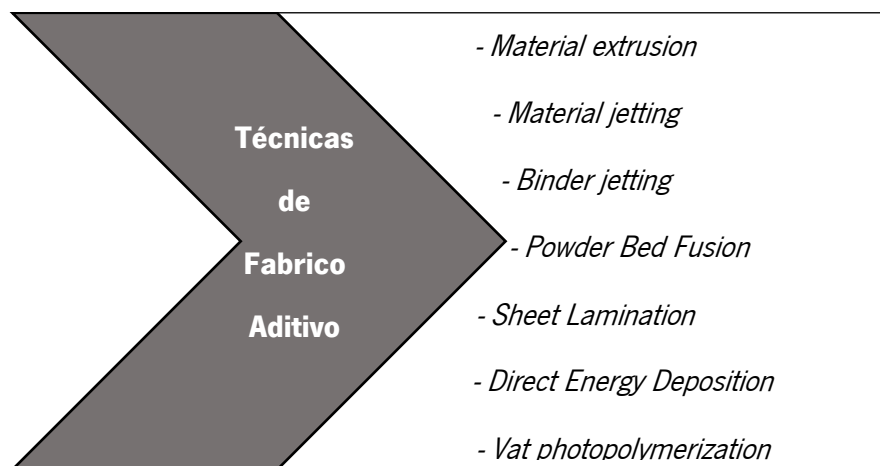


Figura 2.12 - Categorias de processo de fabricação aditiva com base na norma ISO/ASTM 52900.

No que concerne ao processo de fabrico *material extrusion*, este é um processo em que o material é seletivamente distribuído através de um extrusor ou de um orifício [63]. Os processos de *material extrusion* são térmicos e utilizam uma cabeça de extrusão aquecida para amolecer ou derreter material, normalmente plástico, sendo este fornecido sob a forma de filamento. Após fundido, o material passa

através de um orifício de extrusão que deposita o material onde este acaba por solidificar [64]. Um processo específico diz respeito à tecnologia *fused deposition modeling* (FDM) [65, 66].

No que diz respeito à tecnologia *material jetting*, esta é um dos tipos de fabrico aditivo em que as gotículas de material de alimentação são depositadas seletivamente [63]. A técnica *drop-on-demand* é normalmente utilizada para ejetar a gotícula, que obtém uma alta precisão no posicionamento, baixo desperdício e permite um tamanho de gotículas pequenas. O material depositado é curado usando luz UV (ultravioleta). As substâncias utilizadas no processo *material jetting* são tipicamente materiais de natureza viscosa capazes de formar as gotas como os fotopolímeros ou materiais semelhantes à cera [67]. Uma das tecnologias associadas a esta categoria de fabrico aditivo é a *inkjet printing* (IJP) [64, 65].

Quanto ao processo *binder jetting*, este é um processo de fabricação de aditivos no qual um agente adesivo líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó [63]. Um processo específico diz respeito à tecnologia *multijet fusion* (MJF) [65, 68].

Já a tecnologia *powder bed fusion*, esta é uma das tecnologias de fabrico aditivo em que a energia térmica funde seletivamente determinadas zonas. A fonte da energia térmica é um laser ou um feixe de eletrões. Este processo de fabrico aditivo permite inclusive executar peças altamente complexas podendo ser produzidas a partir de materiais metálicos, camada por camada. A energia térmica derrete o material em pó, que depois muda para uma fase sólida à medida que arrefece. Dependendo da qualidade da superfície e dos requisitos de velocidade de produção, o pó é automaticamente aplicado com espessuras de camada de 20 a 100  $\mu\text{m}$  [63, 69]. Alguns processos específicos dizem respeito às tecnologias *selective laser melting* (SLM) [65, 70], *selective laser sintering* (SLS) [65, 71] e *electron beam manufacturing* (EBM) [65, 72].

Relativamente ao processo de fabrico *sheet lamination*, este é uma técnica em que as chapas de material são unidas de maneira a formar um objeto [63]. Neste processo, as folhas de material são então fundidas entre si, com a forma desejada gravada em cada forma, utilizando um dispositivo de corte guiado e controlado por computador para cortar as linhas que produzem os bordos com a forma desejada. Este processo de impressão 3D raro, é atualmente muito utilizado não só com papel, mas também com metal e plástico. De notar que, a laminação de chapas normalmente não é capaz de produzir a mesma complexidade geométrica que outros processos de impressão 3D, uma vez que pode não ser possível aceder a partes internas de um objeto além de que, pode também não ser possível remover o material em excesso do interior da peça [69, 73]. Um processo específico diz respeito à tecnologia *laminated object manufacturing* (LOM) [65, 74]

Em relação ao processo *direct energy deposition*, este é um processo de fabrico aditivo que adiciona material em simultâneo com a entrada de calor [75]. Para a entrada de calor emprega uma energia térmica localizada que pode ser um laser ou um feixe de eletrões, de modo a fundir o material à medida que este é depositado [63, 76]. Cada passagem da cabeça cria um rasto de material solidificado, e as linhas de material adjacentes formam camadas permitindo assim construir objetos tridimensionais [76]. De referir que este processo recorre predominantemente à utilização de materiais metálicos embora também possa funcionar para polímeros, cerâmicos e compósitos de matriz metálica [76]. Assim, esta tecnologia é frequentemente referida como tecnologia de "deposição de metal" dado utilizar maioritariamente como matéria-prima pó metálico ou fio metálico [75, 76]. No entanto, é importante notar que os pós resultam com uma menor eficiência de deposição em comparação com fios de metal dado que somente uma parte do pó total seria derretida e ligada ao substrato [77]. Dois processos específicos, embora cada um com as suas particularidades, dizem respeito às tecnologias *direct metal deposition* (DMD) [64, 65] e *laser powder deposition* (LPD) [65, 78].

Por último, e sendo uma das técnicas mais populares de impressão 3D, encontra-se a técnica *vat photopolimerization*. Esta uma tecnologia de fabricação aditiva no qual um fotopolímero líquido é armazenado no interior de um depósito, dada a necessidade de o processo ocorrer num ambiente controlado, e é seletivamente curado através de um processo de polimerização ativado com luz visível ou radiação ultravioleta (UV) [63, 79, 80]. Após a irradiação, ocorre a reação química que permite formar cadeias entre moléculas de resina líquida curável à luz, reticulá-las e como resultado, solidificar a resina [79, 81]. Os processos de fotopolimerização usam então resinas líquidas curáveis por radiação ou fotopolímeros, como os seus materiais primários, sendo estes materiais fotossensíveis expostos de forma controlada à radiação/luz para obter camadas de material polimerizado [81, 82]. A técnica *vat photopolimerization* dependendo do método de cura pode ser classificada como: estereolitografia (SLA) em que utiliza uma fonte laser para iniciar a reação de polimerização, processamento digital de luz (DLP) em que usa dispositivos digitais de microespelhos para curar completamente a camada de resina e processamento digital contínuo de luz (CDLP)/produção contínua de interface líquida (CLIP) em que o processo de cura recorre a díodos emissores de luz (LEDs) e oxigénio [63, 79, 82].

De notar que, a técnica *vat photopolimerization* é comparável ao processo *powder bed fusion*, mas ao invés de usar um laser para aquecer e agregar as partículas de pó sólidas, utiliza um laser ultravioleta (UV) para curar um monómero curável. Outro aspeto interessante, é que em comparação com *powder bed fusion*, a técnica *vat photopolimerization* oferece uma melhor qualidade superficial dado que o comportamento fluido do polímero tende a atenuar as camadas individuais do objeto 3D [80].

2.2.2.2. TÉCNICAS DE FABRICO ADITIVO PRINCIPAIS NA PRODUÇÃO DE ESTRUTURAS *LATTICE*

Para a produção de estruturas *lattice*, as considerações básicas da escolha do processo de fabrico aditivo seriam os materiais candidatos a utilizar, a resolução do processo, a facilidade de remoção do suporte, e o custo de fabricação [3]. De notar que, com a ajuda de processos de fabrico de aditivos, todos os tipos de materiais como polímeros, metais, ligas podem ser utilizados para o desenvolvimento de estruturas *microlattice*. [6].

Embora existam atualmente muitos processos, tal como já se discutiu anteriormente, os investigadores têm utilizado principalmente os processos FDM, SLA, SLS, SLM e EBM para o fabrico de estruturas treliçadas, encontrando-se seguidamente representadas algumas estruturas *lattice* obtidas por esses mesmos processos específicos de fabrico aditivo [3].

De referir que, pese embora já tenham sido anteriormente abordadas as sete categorias dos processos de fabrico aditivo, nos quais os processos específicos referidos anteriormente se encontram, achou-se por bem salientar de forma sucinta o funcionamento do processo específico de modo as compreender as suas particularidades.

No que concerne à tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*), esta envolve a extrusão de filamentos de materiais termoplásticos fundidos. O material é aquecido no interior da cabeça de extrusão acima do seu ponto de fusão e, solidifica logo após a extrusão permitindo subsequentemente soldar às camadas anteriores. A cabeça do sistema FDM inclui dois extrusores que podem ser, um para o material da peça e outro para o material de suporte. [3, 6, 64, 83].

Na Figura 2.13 encontra-se assim representados algumas estruturas *lattice* obtidas por este processo.

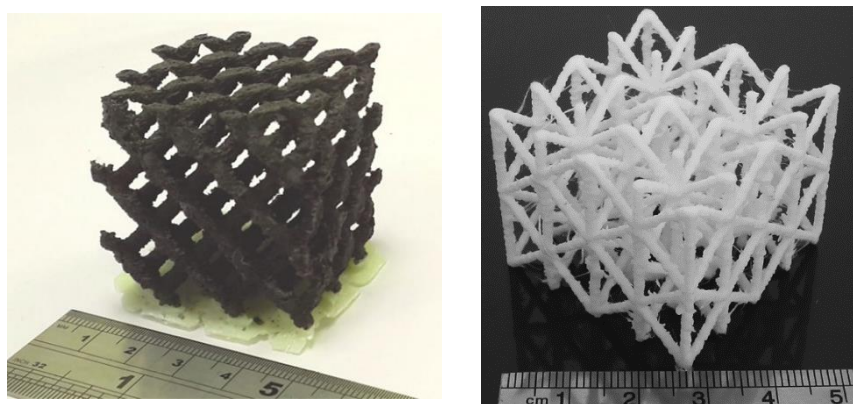


Figura 2.13 – Exemplos de estruturas *lattice* fabricadas pelo processo de fabrico aditivo FDM: usando polímero ABS com 10 vol.% de filamento de ferrite NiZn. [84] à esquerda e, usando PLA [66].

Quanto à técnica SLA, esta baseia-se no princípio da fotopolimerização de resinas monómeras fotossensíveis quando expostas à radiação UV [64]. O processo de estereolitografia utiliza então uma luz ultravioleta (UV) para curar seletivamente a resina líquida fotossensível que se encontra no interior de um depósito, solidificando as partes atingidas permitindo no final formar a peça desejada [3, 6]. De referir que, em comparação com outras técnicas de impressão, as peças impressas em SLA atingem um maior grau de detalhes visto que a luz UV pode ser digitalizada com alta precisão e, permitir assim, obter superfícies mais nítidas e limpas [85].

Na Figura 2.14 encontra-se assim representados algumas estruturas *lattice* produzidas por este processo.

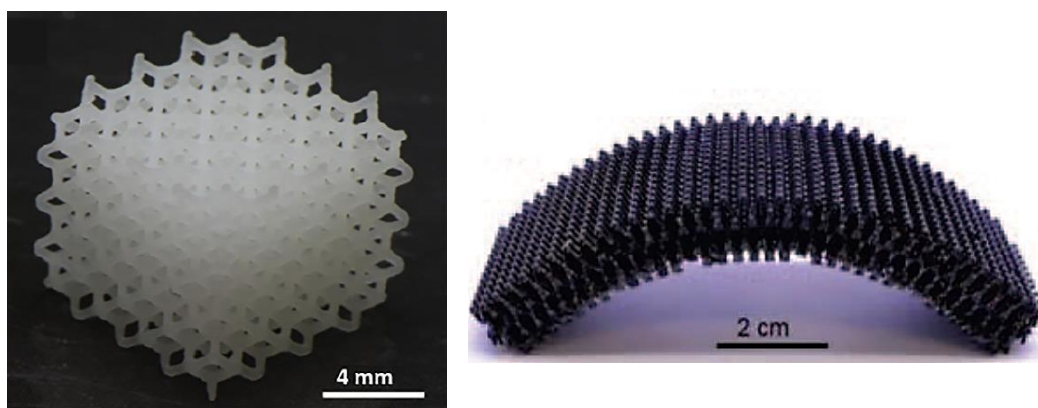


Figura 2.14 - Exemplos de estruturas *lattice* fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLA: arquiteturas poliméricas [86] [3].

Na tecnologia *selective laser sintering* (SLS), é fornecido um leito de material em pó [6]. Este processo utiliza um feixe laser para sinterizar seletivamente partículas de material e permitir que os grãos se fundam [3, 64]. O material sinterizado forma a peça, enquanto o material em pó não sinterizado permanece no lugar para suportar a estrutura [64]. Muitos materiais em pó podem ser utilizados neste processo, incluindo polímero, cera, metal, cerâmica, compósitos de polímero/vidro e compósitos de polímero/metal [3]. Contudo, o processo é ainda relativamente lento quando comparado com o EBM para estruturas metálicas, por exemplo e sofre de questões como a distribuição não uniforme do campo térmico, que pode levar a distorções térmicas e fissuras no produto [64]. Apesar disso, apresenta um elevado grau de precisão e qualidade superficial tornando-o um dos mais processos de FA de metal mais comumente utilizados [64].

Na Figura 2.15 encontra-se assim representadas algumas estruturas *lattice* criadas por este processo.

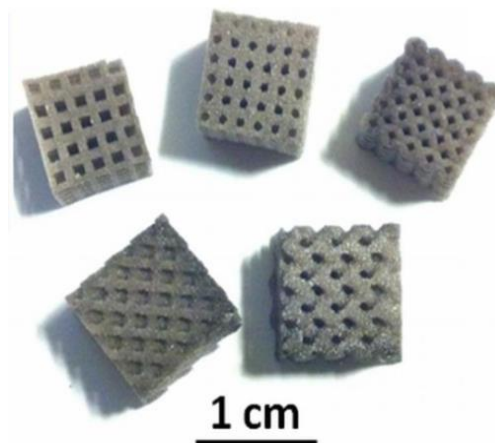


Figura 2.15 - Exemplos de estruturas *lattice* fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLS [87].

Relativamente à técnica *selective laser melting* (SLM) esta apresenta um processo semelhante ao do SLS sendo considerada como uma variante do SLS diferindo, no entanto, nos detalhes técnicos [64, 83]. O processo de fusão seletiva a laser utiliza um feixe laser de muito maior densidade energética para derreter completamente e fundir o pó numa única etapa [88]. Por conseguinte, a potência do feixe laser é assim normalmente mais elevada [64]. O processo é realizado sob condições atmosféricas controladas e tem dominado a indústria do FA do metal, particularmente para o fabrico de componentes metálicos, de média a grande dimensão com estruturas topologicamente otimizadas [83]. É capaz de fabricar diretamente uma peça quase totalmente densa sem pós-processamento. Os materiais em pó disponíveis para este processo incluem aço inoxidável, liga de titânio, liga cobalto-cromo, liga de níquel e liga de alumínio [3].

Na Figura 2.16 encontram-se assim evidenciadas algumas estruturas *lattice* criadas por este processo abordado.

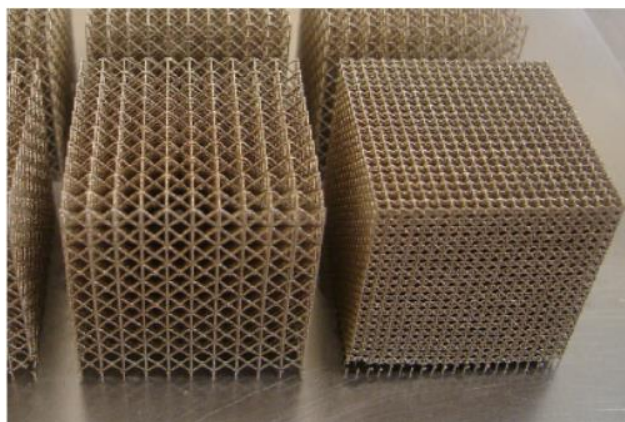


Figura 2.16 - Exemplos de estruturas *lattice* fabricadas pelo processo de fabrico aditivo SLM: usando aço inoxidável 316L [89].



Por último, quanto ao processo *electron beam manufacturing* (EBM), este é outro processo de FA baseado na tecnologia *powder bed fusion*, da mesma forma que os dois processos específicos anteriormente falados. Este processo funciona de forma semelhante ao processo SLM, mas ao invés de utilizar um raio laser, utiliza um feixe de elétrons como fonte de energia para fundir as camadas de pós metálicos [3, 37]. Uma vez que os materiais devem ser condutores elétricos para libertar os elétrons absorvidos, o feixe de elétrons só pode ser utilizado para metais, tendo assim uma gama limitada de materiais em comparação com a SLM [90]. Assim, alguns materiais comerciais utilizados para este processo incluem liga de titânio e liga cobalto-cromo [3]. De referir que, o processo EBM ocorre num ambiente de vácuo para evitar a contaminação e oxidação do pó e do produto final.

Existem algumas semelhanças entre os processos EBM e SLM. Ambos trabalham com base na tecnologia camada por camada e derretem o pó acima do ponto de fusão [72, 90]. No entanto, ao contrário do SLM, a placa metálica de base e o leito de pó precisam de ser pré-aquecidos antes do varrimento dos elétrons na técnica EBM [91]. A EBM é assim um processo mais rápido e rentável do que o SLM, mas a qualidade superficial dos componentes construídos é relativamente irregular [92].

Na Figura 2.17, encontram-se assim evidenciadas algumas estruturas *lattice* construídas por este processo exposto.

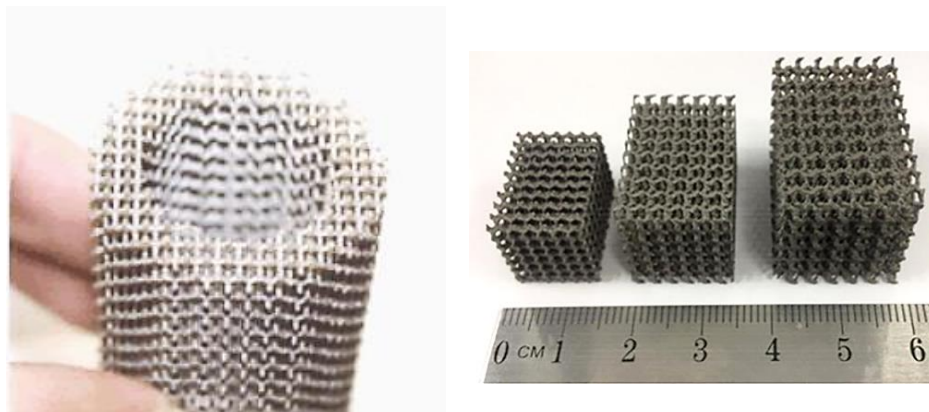


Figura 2.17 - Exemplo de estrutura *lattice* fabricada pelo processo de fabrico aditivo EBM: usando em ambas a liga Ti-6Al-4V [93, 94].

### 2.2.3. VANTAGENS E INCONVENIENTES GERAIS DO PROCESSO DE FABRICO ADITIVO PARA O FABRICO DE ESTRUTURAS *LATTICE*

A tecnologia de fabrico aditivo não se trata de substituir o fabrico convencional em massa que, se necessário, pode produzir milhares de peças idênticas a baixo custo, mas sim de fabricar formas e produtos que não são possíveis nem rentáveis de fabricar através do fabrico convencional [95].

A tecnologia de fabrico aditivo providencia importantes vantagens tais como, a possibilidade de imprimir geometrias complexas, que são difíceis ou impossíveis de alcançar com os métodos tradicionais de fabrico, e a capacidade de trabalhar com uma grande gama de materiais, incluindo metálicos, cerâmicos, polímeros e as suas combinações, sob a forma de compósitos e híbridos [96]. O desenvolvimento desta tecnologia é impulsionado pela procura de produtos personalizados, ciclos de desenvolvimento de produtos mais curtos, maior foco na sustentabilidade e redução dos custos de fabricação [97]. No entanto, acontece que esta tecnologia ainda tem desvantagens tais como a baixa produtividade, a baixa qualidade e a incerteza nas propriedades mecânicas obtidas [64]. Desta forma, assegurar que as peças tenham propriedades mecânicas semelhantes às fabricadas por processos convencionais é uma necessidade persistente. Para a tecnologia de fabrico aditivo, as propriedades mecânicas dependem particularmente da orientação das camadas da peça sendo que, devido ao fabrico camada por camada as peças têm propriedades anisotrópicas [98].

Alguns dos desafios de fabrico associados aos produtos dizem respeito ao acabamento superficial que apresenta limitações consideráveis devido a aspetos mecânicos e térmicos, sendo que a qualidade da superfície depende também de fatores como a orientação da peça, a espessura da camada e a orientação da deposição do material [96, 99].

Num inquérito realizado pela PwC publicado em 2014 [100], verificou-se que sensivelmente metade dos fabricantes inquiridos referiu que a qualidade incerta do produto final (a resistência, a durabilidade, etc) era uma barreira à adoção do processo de fabrico aditivo [100]. Embora seja possível fazer algumas formas e estruturas complexas e não convencionais por fabrico aditivo, precisa-se ainda de implementar um esquema robusto de garantia da qualidade, sobretudo devido à falta de ferramentas e metodologias metrológicas adequadas e suficientes, disponíveis para as diferentes técnicas de fabrico aditivo [95]. A fabricação aditiva continua desta forma a ter como um desafio a metrologia dado que, ainda não estão totalmente disponíveis técnicas não destrutivas adequadas que permitam avaliar corretamente o desempenho da peça obtida e, investigar características exclusivas das peças tais como a porosidade, as falhas incorporadas, a geometria complexa das peças e as características internas intrincadas [101].

A Figura 2.18 mostra um gráfico de radar onde são comparados diversos fatores entre a técnica SLS (sinterização seletiva a laser), que já amadureceu o suficiente possibilitando a comparação, com a produção convencional (método industrial antigo) [95].

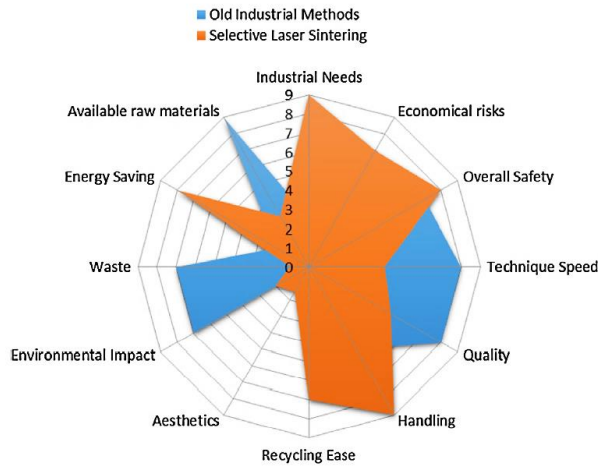


Figura 2.18 - Gráfico de radar do fabrico convencional vs sinterização seletiva a laser (escala 0-9, com 9 o fator mais significativo) [95].

Através do gráfico acima representado, no que concerne a aspetos técnicos pode destacar-se a favor do fabrico aditivo o manuseamento. Já favorável ao fabrico convencional, destacam-se as matérias-primas disponíveis para o processo em si. Este fator referido vem realçar que apesar de no fabrico aditivo ser possível trabalhar com uma grande variedade de materiais, há ainda um número e tipos de materiais a serem utilizados limitados. Apesar disso, há boas expectativas para a próxima geração de impressoras 3D com métodos de processamento mais aprimorados, permitindo a fabricação com uma maior variedade de materiais [96].

No que concerne aos custos, o aumento da complexidade dos objetos aumenta apenas de forma marginal os custos de produção, tal como se retrata graficamente na Figura 2.19 [102]. Ou seja, enquanto que no fabrico aditivo quanto mais complexa a peça, maior a poupança de custos, pelo contrário, com os métodos tradicionais, uma peça altamente complexa normalmente custa muito mais do que uma peça muito simples [102].

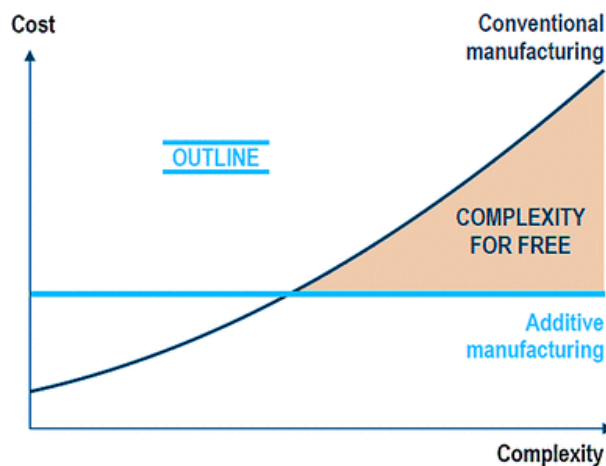


Figura 2.19 - Custo vs. complexidade entre fabrico aditivo e métodos convencionais [102].

A técnica de fabrico aditivo apresenta ainda uma facilidade dado ao potencial de eliminação de ferramentas, ou seja, produção direta possível sem ferramentas dispendiosas [102].

Os benefícios do fabrico de aditivos necessitam, no entanto, de ultrapassar determinados problemas, alguns já discutidos, que precisariam de ser resolvidos. Alguns exemplos de problemas são o tempo de fabrico, o elevado custo inicial de produção, as especificações das normas, e, como já referido, os materiais e as propriedades mecânicas. A produção de um objeto requer que o “desenho” digital seja encaminhado para uma impressora. Isto acaba por abrir a porta não só a revisões ilimitadas, reajustes e melhorias do produto, mas também a uma estratégia muito mais complexa de conceção e implementação do produto [95].

No entanto, de ressaltar que a tecnologia está a evoluir a um ritmo acelerado e, espera-se que, se os principais obstáculos à adoção do fabrico aditivo forem discutidos, este possa ter um nicho de mercado com um potencial de crescimento enorme [95].

#### 2.2.3.1. TÉCNICAS HÍBRIDAS DE FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS *LATTICE* METÁLICAS DEVIDO A LIMITAÇÕES DE FABRICO ADITIVO

Apesar da possibilidade de fabricar estruturas *lattice* por técnicas de fabrico aditivo, os parâmetros de fabrico ainda precisam de ser melhorados de maneira a reduzir questões comuns como a microporosidade das escoras, a rugosidade nas superfícies e as fracas propriedades mecânicas que podem ocorrer [103].

Os processos de fabrico aditivo metálico utilizam um raio laser ou um feixe de eletrões sobre um leito de pó metálico sendo capazes de fabricar estruturas metálicas celulares complexas [104]. Tem havido desenvolvimentos significativos no fabrico aditivo metálico aplicado à produção de estruturas celulares: a técnica *selective laser sintering* (SLS), a técnica *selective laser melting* (SLM), a técnica *electron beam manufacturing* (EBM) e a técnica *direct metal laser sintering* (DMLS) são processos de FA disponíveis para fabricar estruturas celulares metálicas 3D [104, 105]. Apesar destas tecnologias possibilitarem fabricar peças com geometrias celulares complexas, existem ainda várias restrições no processo, o que limita a escalabilidade das peças para aplicações estruturais [104].

Por exemplo, no que concerne aos materiais disponíveis, a seleção de materiais de impressão é limitada: por exemplo, as ligas de alumínio são difíceis de processar devido à alta condutividade térmica e à alta refletividade ótica [106, 107]. Outro aspeto diz respeito às tensões térmicas residuais que as peças fabricadas sofrem [108]. Além disso, o mecanismo de padronização baseado em energia unidimensional induz um mau acabamento superficial e propriedades anisotrópicas das peças causadas

pelos efeitos combinados do tamanho do pó e da potência/velocidade de alimentação do laser ou do feixe de elétrons [109].

Para além dos inconvenientes já referidos, embora as técnicas de FA metálicas sejam capazes de produzir estruturas com paredes e escoras relativamente finas (espessuras  $\sim 0,24$  a  $0,80$  mm [105, 110-112]), podem ter desvantagens significativas tanto ao nível do controlo dimensional como microestrutural [113, 114]. O que se sabe é que as peças metálicas de FA apresentam defeitos de macroescala, tais como [115-120]: pó não fundido (ou seja, falta de fusão); porosidades; delaminação; e distorções devidas a tensões residuais induzidas termicamente. Estas heterogeneidades geométricas não afetam apenas o desempenho nominal da *lattice*, como a sua resposta elástica eficaz e o comportamento de cedência, mas também podem desencadear falhas estruturais prematuras [119].

Já uma escala microestrutural, as técnicas referidas estão associados a variações extremas de temperatura nos seus ciclos de fusão-solidificação [110]. Consequentemente, devido então a estes complexos ciclos térmicos e altas taxas de arrefecimento, podem ter grãos com diferentes morfologias [112, 116, 117, 121, 122] (como por exemplo, lamelar, equiaxial, colunar e dendrítico) e comportamento anisotrópico dependente da direção de construção. Esta microestrutura heterogénea pode ser ainda mais acentuada devido à recristalização cíclica causada pela alta temperatura durante a deposição repetida de camadas [116].

No que concerne à fundição de metais, este processo convencional permite um excelente controlo microestrutural [123-125] e dimensional [126, 127]. Além disso, houve já desenvolvimentos significativos relativos ao enchimento de estruturas de paredes finas, ou seja, ao enchimento de microcanais [128]. Contudo, as principais dificuldades associadas à fundição de estruturas treliçadas surgem de problemas relacionados com a produção de moldes [129].

Assim, de maneira contornar algumas destas questões que podem inclusive superar as desvantagens das técnicas de FA metálicas, várias investigações têm-se concentrado no desenvolvimento de novas técnicas híbridas [36, 104, 105, 130, 131], como forma alternativa de fabricar metais celulares 3D.

Como tal, uma possibilidade de contornar muitas das questões acima referidas é através da fabricação da estrutura *lattice* primeiramente preparada por um processo de FA polimérico, e subsequente utilizá-la como modelo de sacrifício na tecnologia de fundição por modelo perdido para a produção de estruturas celulares metálicas finas, sendo este também o método de fabricação do presente trabalho.

De notar que, a tecnologia de fundição por modelo perdido está em conformidade com requisitos específicos de fundir peças de paredes finas, grande variabilidade do material e a possibilidade de produzir formas complexas [132]. É também uma tecnologia amplamente utilizada para produzir protótipos e pode ser bem combinada com a impressão 3D de modelos [132]. Esta combinação é denominada "tecnologia híbrida" [133].

O avanço em técnicas híbridas de fundição por modelo perdido assistido por fabrico aditivo permite fabricar estruturas em que é mais fácil fazer a customização ao nível das propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas [134], neste caso para o presente trabalho o que é pretendido é valores elevados de rigidez e amortecimento.

O presente estudo apresenta geometrias de estruturas metálicas treliçadas fabricadas através da fabricação de modelos poliméricos por FA, seguidos da fundição por modelo perdido da liga de alumínio A356.

### 2.3. PROJETO MECÂNICO: A INTERAÇÃO ENTRE FUNÇÃO, MATERIAL, FORMA E PROCESSO

Ashby [135] desenvolveu uma abordagem de conceção mecânica baseada na teoria clássica, considerando que a conceção fundamental de um sistema mecânico pode ser dividida em quatro áreas distintas que interagem, tal como se encontra representado na Figura 2.20.

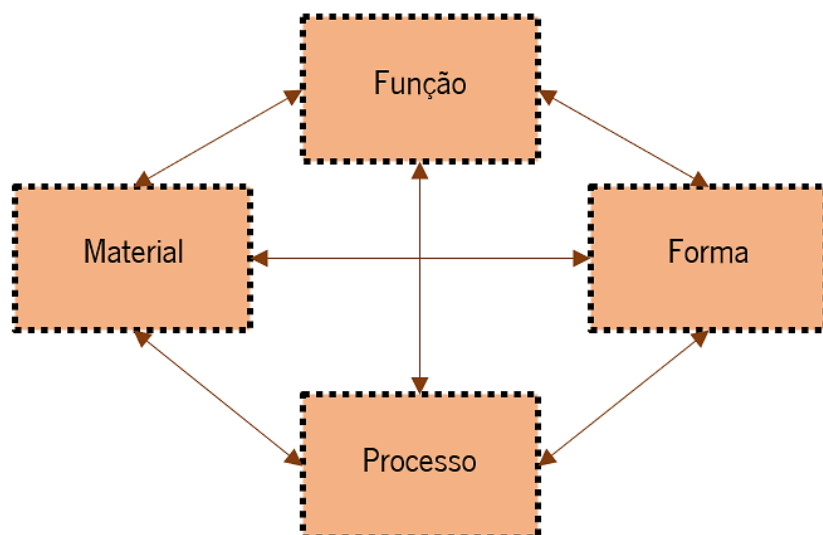


Figura 2.20 - Interação entre função, material, forma e processo, adaptado de Ashby [135].

Tal como se pode observar, todas as áreas acima apresentadas são interdependentes. Verifica-se assim que, a seleção de um material e processo não pode ser separada da escolha da forma. Usa-se a palavra "forma" para incluir a externa, a macro-forma e, quando necessário, a interna, ou a micro-forma, como numa estrutura alveolar ou celular. Para fazer a forma, o material é sujeito a processos que se pode designar pelo fabrico. Por outro lado, a função determina a escolha tanto do material como da forma. Além disso, o processo é influenciado pelo material, ou seja, pela sua formabilidade, maquinabilidade, soldabilidade, tratamento térmico, entre outros. Ademais, o processo interage obviamente com a forma - o processo determina a forma, o tamanho, a precisão e, claro, o custo [135].

De notar que as interações observadas são de dois sentidos, ou seja, a especificação da forma restringe a escolha do material e do processo, mas também a especificação do processo limita os materiais que se podem utilizar e as formas que podem assumir [135].

Tudo o que foi referido acima, torna-se pertinente abordar e ter em consideração atendendo que, no presente trabalho se pretende fabricar uma estrutura e, como tal, é importante perceber estas interações.

O objetivo fundamental das estruturas *lattice* que estão a ser desenvolvidos neste estudo é promover um sistema com melhor rigidez e resistência mecânica e, ainda um melhor amortecimento das vibrações estruturais. Todos estes benefícios devem também ser alcançados de forma a manter uma solução leve, ou seja, com baixos valores de densidade relativa nas configurações sólidas celulares desejadas alcançar. No que concerne à seleção de material e ao método de fabrico já foram abordados no subcapítulo anterior e, como tal, o esquema pode ser compreendido, na Figura 2.21, da seguinte maneira.

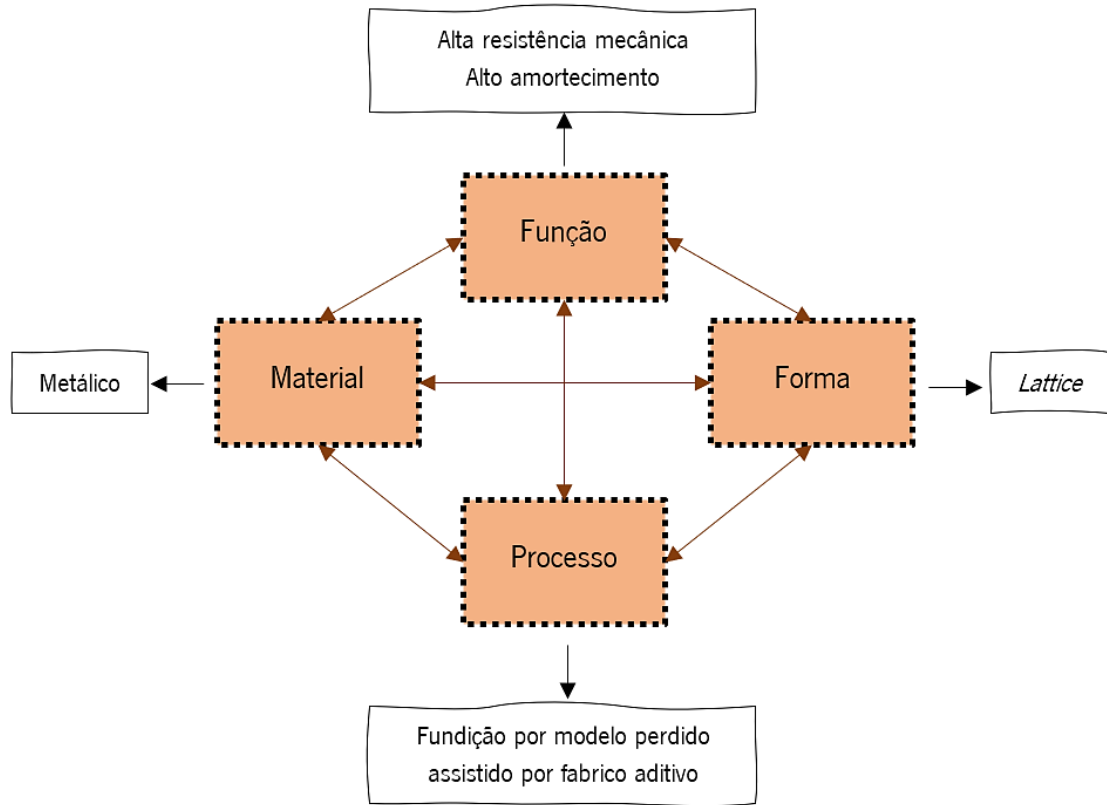


Figura 2.21 - Interação função, material, forma e processo, aplicado ao estudo do presente trabalho, adaptado de Ashby [135].



### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo, encontra-se apresentada a metodologia numérica utilizada para realizar os diversos estudos numéricos necessários e, ainda, a metodologia de fabricação adotada para a produção das microvigas reticuladas.

#### 3.1. METODOLOGIA NUMÉRICA

##### 3.1.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS/ENQUADRAMENTO

Uma vez usado como base para grande parte do presente trabalho a simulação pelo método dos elementos finitos (FEM), surge a necessidade de expor de forma breve algumas noções. Além disso, este método é o elemento-chave para o uso da ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys*. Dada a relevância desta ferramenta do *Ansys* utilizada no trabalho torna-se também necessário compreender alguns conceitos base de maneira a ser possível se inteirar das potencialidades desta ferramenta.

##### 3.1.1.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma técnica geral que permite obter soluções aproximadas de problemas físicos. A aplicação da técnica consiste em dividir o domínio da solução num número finito de subdomínios simples (elementos finitos) e utilizar princípios variacionais para obter uma aproximação da solução [136]. Um exemplo disso encontra-se representado na Figura 3.1 de uma divisão típica de elementos finitos de um domínio bidimensional com elementos finitos triangulares.

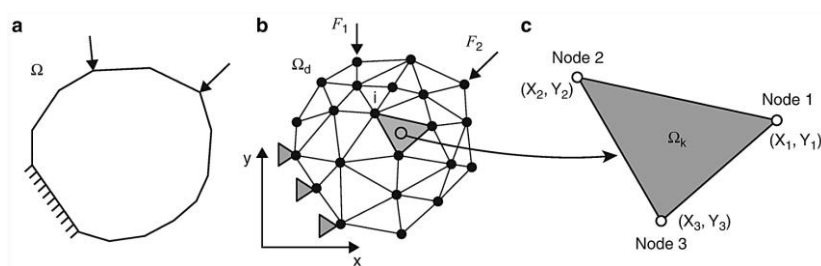


Figura 3.1 - Representação de domínio e subdomínio de um problema 2D, relativamente às condições fronteira de força e deslocamento [137].

O método dos elementos finitos possibilita assim a discretização de um sistema contínuo através da aproximação da resposta por funções selecionadas, sendo desconhecidos apenas os pesos da contribuição de cada função para a resposta final. No método dos elementos finitos estes pesos estão

diretamente associados aos deslocamentos de pontos determinados da estrutura, designados por nós [138]. De notar que, este método requer a solução de um elevado número de equações algébricas, quer para respostas estáticas quer para problemas de valores próprios utilizados no estudo de vibrações [138].

Assim, ao contrário do método convencional que resolve os problemas de tensão e deformação utilizando teorias de vigas, colunas e placas, a sua aplicação é restrita à maioria das estruturas e cargas simples [139]. Por outro lado, o método dos elementos finitos é um instrumento essencial e poderoso para resolver problemas estruturais dado que o seu funcionamento consiste em dividir uma estrutura em pequenos elementos, assumir que cada elemento é um modelo matemático e depois fazer a assemblagem dos elementos resolvendo o conjunto [139], tal como se encontra mais compreensível na Figura 3.2.

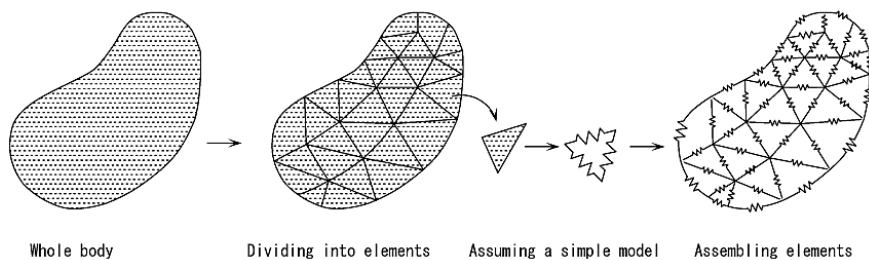


Figura 3.2 - Projeto básico associado ao FEM [139].

→ ANÁLISE ESTÁTICA

Uma análise estática de elementos finitos só pode ser realizada se o sistema a ser simulado não depender do tempo, e se as cargas a ser aplicadas forem constantes e, ainda não considerar as forças de inércia [140, 141]. O sistema linear de equações, que pode ser representado na Equação (3.1) por:

$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (3.1)$$

Na análise de tensões,  $\{x\}$  é o vetor dos deslocamentos nodais,  $\{F\}$  é o vetor das forças nodais, e  $[K]$  é a matriz de rigidez.

→ ANÁLISE MODAL

Em problemas de dinâmica, são determinadas frequências e modos de vibração e/ou resposta a forças dependentes do tempo [141].

Para um sistema dinâmico, com vários graus de liberdade, a equação de movimento que governa a resposta dinâmica do sistema, quando sujeito a excitações externas, é dada sob a forma da matriz generalizada [142, 143], representada na Equação (3.2) por:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (3.2)$$

Onde  $M$ ,  $C$  e  $K$  são a matriz de massa, amortecimento e rigidez do sistema, respetivamente. Já  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ ,  $x(t)$  e  $f(t)$  são os vetores de aceleração, velocidade, deslocamento e excitação externa em função do tempo, respetivamente.

Para um sistema não amortecido e sem perturbação externa, a Equação (3.1) é reduzida a:

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (3.3)$$

Uma solução do sistema linear homogéneo de segunda ordem da Equação (3.2) pode ser escrita como:

$$x(t) = \phi_i \cos(\omega_i t + \psi_i) \quad (3.4)$$

Onde  $\psi_i$  é um ângulo de fase,  $\phi_i$  representa um vetor próprio e  $\omega_i$  está relacionado com o valor próprio do problema de valores e vetores próprios

Calculando a segunda derivada da Equação (3.4) em ordem a  $t$  obtém-se:

$$\ddot{x}(t) = -\omega_i^2 \phi_i \cos(\omega_i t + \psi_i) \quad (3.5)$$

que em conjunto com a Equação (3.4) pode ser inserido na Equação (3.3), obtendo-se:

$$K\phi_i = \omega_i^2 M\phi_i \quad (3.6)$$

Assim, os vetores próprios  $\phi_i$  correspondem aos modos de vibração, cujas componentes representam amplitudes, e  $\omega_i$  representam as frequências naturais angulares [143].

### 3.1.1.2. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Utilizando pacotes comerciais de desenho assistido por computador e modelação de elementos finitos (CAD-FEM), como os *softwares* Ansys, CATIA, Creo, Solidworks e Mimics, diversas estruturas celulares foram criadas e otimizadas para uma grande maioria de componentes [10]. Do ponto de vista da conceção estrutural, a forma mais simples de gerar uma estrutura celular é através da repetição da célula unitária em três eixos principais. De notar que algumas bibliotecas de topologia de células unitárias estão disponíveis em *softwares* comerciais, tais como Materialise e Autodesk Netfabb.

No entanto, é importante de referir que a conceção das estruturas acima referidas diz respeito a estruturas *lattice* 3D. Já no presente trabalho, focou-se na conceção de microvigas 2D, recorrendo à ferramenta *Topology Optimization* do Ansys para gerar as geometrias de vigas reticuladas.

Dada a relevância e o foco de trabalho em torno da ferramenta *Topology Optimization* surgiu a necessidade de perceber previamente de que forma trabalha esta ferramenta e a sua utilidade e, ainda analisar as equações usadas para proceder à otimização topológica nos dois modos utilizados, o modo estático e o modal.

A otimização da topológica é então um método avançado de concepção estrutural que pode obter a configuração ideal da estrutura através de uma distribuição razoável de material satisfazendo as condições de carga, desempenho e um conjunto restrições especificadas [144].

De notar que existem outros métodos de otimização sendo estes designados de otimização de tamanho e de forma. A otimização topológica é diferente da otimização de tamanho e forma, uma vez que o componente otimizado pode ser de qualquer forma dentro do espaço de *design*, ou seja, a otimização topológica é independente da configuração inicial [144]. Os resultados são frequentemente geometrias complexas, difíceis de prever, sendo os resultados não intuitivos comuns. Tal como se observa na Figura 3.3 os métodos de otimização de tamanho e forma, representados em a) e b) respetivamente, seguem um *design* pré-configurado, enquanto a otimização topológica, representada em c), está a assumir uma forma livremente no espaço de *design*.

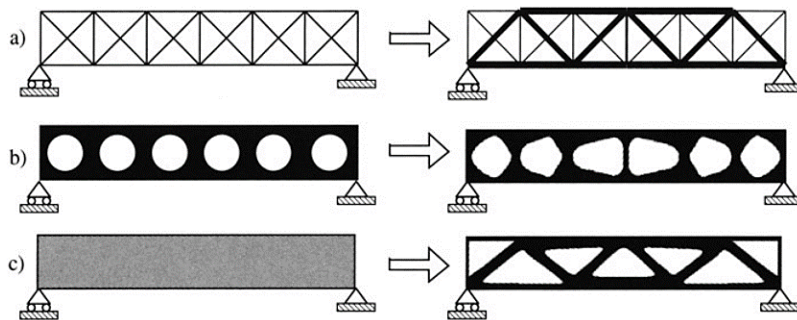


Figura 3.3 - Três tipos diferentes de otimização estrutural representados à direita [145]: a) Otimização de Tamanho; b) Otimização de Forma e em c) Otimização Topológica.

A otimização topológica refere-se assim a uma forma de otimização estrutural concebida para encontrar uma geometria ótima [146]. A análise por elementos finitos é utilizada de forma iterativa para determinar que material da malha atual deve ser mantido sólido, e qual deve ser definido como nulo [147]. No entanto, embora a otimização topológica crie estruturas de conformidade ótimas para uma determinada restrição e domínio de *design*, não tem em conta a sua fabricação [146]. As estruturas que cria são muitas vezes difíceis ou impossíveis de fabricar utilizando processos tradicionais, sendo que um método para evitar isto é a utilização de fabricação aditiva [146].

A otimização topológica refere-se então a um método de projeto matemático baseado em simulações e otimizações iterativas [148]. Este método é frequentemente utilizado para otimizar a disposição do material em aplicações estruturais para determinadas condições de fronteira e um determinado conjunto de cargas e restrições, identificando onde o material deve ser colocado num determinado domínio para potenciar propriedades desejadas, como por exemplo, a rigidez [97, 149].

Através desta técnica pretende-se obter estruturas o mais eficientes possíveis, e que são frequentemente estruturas ou geometrias não intuitivas, como já referido.

Tem sido assim desenvolvida como uma técnica de conceção estrutural corrente para estruturas de alto desempenho, leves e multifuncionais, sendo amplamente utilizada por isso em diversas áreas como na indústria aeroespacial [43] automóvel [146] e arquitetura [150].

O objetivo da otimização topológica é assim encontrar a melhor utilização de material para um corpo, de modo que um critério objetivo (ou seja, rigidez global, frequência natural, etc.) atinja um valor máximo ou mínimo sujeito a determinadas restrições (ou seja, redução de volume) [151].

Um problema geral de otimização topológica consiste numa formulação com as seguintes características representadas na Equação (3.7).

$$\begin{aligned} \min_x: & f_i(x, y(x)), i = 1, 2, \dots, l \\ \text{Sujeito a: } & \begin{cases} g_j(x, y(x)) \leq 0, j = 1, 2, \dots, l \\ h_k(x, y(x)) = 0, k = 1, 2, \dots, l \\ x \in [a, b] \end{cases} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Os problemas de otimização topológica que foram estudados no presente trabalho dizem respeito à maximização da rigidez, estática e dinâmica.

No que diz respeito ao primeiro caso, o estudo reside na maximização da rigidez estática. Isto pode também ser declarado como o problema da minimização da conformidade da estrutura. Ou seja, o objetivo é minimizar a conformidade (*compliance*), isto é, minimizar a energia da conformidade estática estrutural [152]. Isto porque a conformidade é uma forma de trabalho realizado na estrutura através da carga aplicada. Assim, uma menor conformidade significa um menor trabalho realizado pela carga sobre a estrutura, o que resulta num menor armazenamento de energia na estrutura que, por sua vez, significa que a estrutura é mais rígida [151]. A conformidade da estrutura foi definida então como a função objetivo e foi aplicado uma restrição na estrutura associado ao volume.

O objetivo passa então por encontrar as variáveis de *design*, ou seja, a distribuição da densidade ( $x$ ), que minimiza a deformação da estrutura sob as condições de suporte e carga impostas. De notar uma vez mais que, minimizar a conformidade é o equivalente a maximizar a rigidez estática global estrutural [152].

A conformidade,  $c$ , pode ser definida como na Equação (3.8), obtida pelo inverso da rigidez  $K$  [146].

$$c(x) = F^T U(x) \quad (3.8)$$

Onde  $U$  e  $F$  representam os vetores de deslocamento e força nodais, respetivamente.

Na Equação (3.9) encontra-se então representada a formulação do problema de mínima conformidade.

$$\begin{aligned} \min_x: c(x) &= F^T U(x) \\ \text{sujeito a: } &\begin{cases} \frac{V(x)}{V_0} = r \\ F = KU \\ 0 < x_{min} \leq x \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Onde a fração de volume é representada por,  $r$ , sendo  $V(x)$  e  $V_0$  o volume de material disponível e o volume do domínio de *design*, respetivamente. Assim, o problema tem uma restrição de igualdade no volume  $\frac{V(x)}{V_0} = r$  e, o vetor força  $F = KU$  é uma equação de estado, sendo que numericamente pode ser mais eficiente de utilizar  $c = F^T U$ . No que concerne à condição  $0 < x_{min} \leq x \leq 1$  esta impõe as restrições laterais nas variáveis de *design*.

De notar que, no que se refere ao segundo caso, ou seja, a maximização da rigidez dinâmica, o procedimento e a abordagem é semelhante só que para este estudo o que se pretende é maximizar a frequência natural da estrutura sujeita a carga dinâmica, satisfazendo ao mesmo tempo um constrangimento no volume da estrutura. A equação necessária ter como base passa a ser a Equação (3.10).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.10)$$

Onde  $\omega_n$  é designada por frequência natural do sistema,  $K$  corresponde à rigidez e  $m$  à massa do sistema.

### 3.1.2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO NUMÉRICO EFETUADO

De forma a iniciar o processo numérico definiu-se primeiramente as dimensões das duas microvigas que se quis usar para realizar os estudos numéricos. De notar que as dimensões das microvigas foram pensadas tendo em consideração o intuito de fazer futuros ensaios de validação experimental recorrendo ao equipamento DMA, equipamento este específico de realização de ensaios mecânicos. Assim, de forma esquematizada as dimensões e respetivas microvigas encontram-se representadas na Figura 3.4. De ressaltar que as duas partes externas representadas em cada microviga e as suas dimensões foram pensadas com o intuito de serem fixadas no equipamento, sendo a zona da parte externa esquerda definida para o equipamento conseguir agarrar a peça e a outra parte do lado direito para a aplicação da carga, tendo sido ambas criadas porque não se queria que o equipamento agarrasse na estrutura *lattice* em si.

Assim sendo, dado que apenas a subdivisão do meia tina como objetivo ser otimizada, apenas esta foi tida em conta nos estudos numéricos realizados.

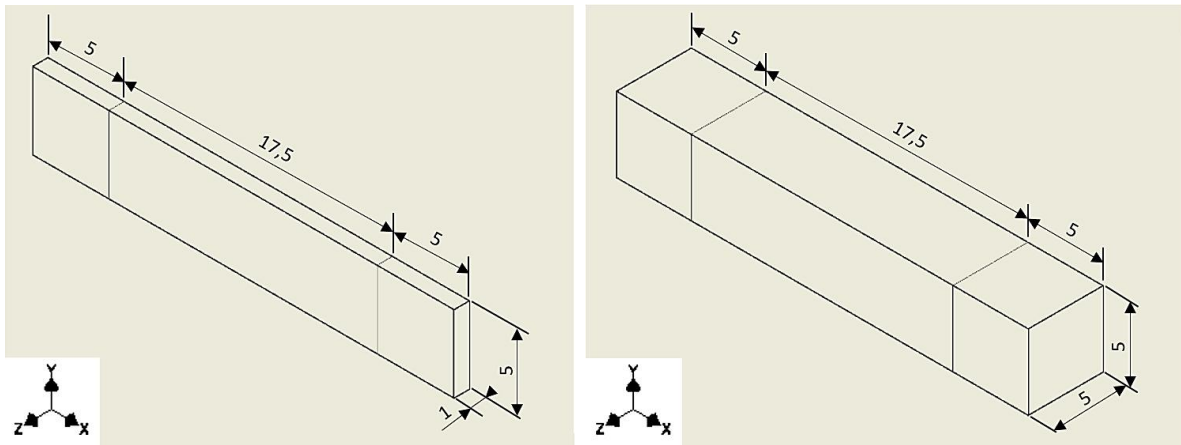


Figura 3.4 - Esquemática das duas microvigas idealizadas: a da esquerda para os estudos no *Plain Stress*, estado plano de tensão, e a da direita para os estudos no *Plain Strain*, estado plano de deformação.

Como se pode visualizar, o que difere entre ambas é apenas a espessura, mas houve a necessidade de efetuar esta distinção dado se pretendeu no estudo estático aplicar a carga no eixo dos  $zz$  e no eixo dos  $yy$ . Ou seja, para o primeiro caso de *plain stress* as peças são muito finas, mas com a carga no sentido dos  $yy$  obrigou a alterar a espessura da peça. Assim sendo, no caso de aplicação da carga no sentido do eixo dos  $yy$ , e sabendo que neste caso de *plain strain* as peças já não são tão finas, houve a necessidade de fazer esta alteração na dimensão da peça. Portanto, em ambos os casos as microvigas estiveram sujeitas à flexão no estudo estático, mas em sentidos diferentes.

Assim, determinadas as dimensões das peças, definiu-se o material pretendido para as microvigas tendo sido selecionado, como já referido anteriormente, a liga A356. Esta é uma liga de alumínio comum usada para fundir componentes devido à sua capacidade de ser fundida em bloco cerâmico para produzir geometrias complexas e de paredes finas [153, 154]. Assim, dado o processo definido para fabricação ser fundição por modelo perdido assistido por fabrico aditivo, achou-se que esta liga seria apropriada. Na Tabela 3.1 encontram-se então apresentadas as propriedades mecânicas no domínio elástico desta liga, necessárias de introduzir para a análise de elementos finitos.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas da liga A356 necessária para introduzir no *Ansys*.

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	2700	Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de <i>Young</i>	71,8	GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,3	

Os estudos numéricos tiveram então como objetivo deduzir formas reticuladas das microvigas por topologia. Assim, o trabalho proposto passou por fazer rotinas de otimização de forma a reduzir a massa e avaliar como varia a rigidez das estruturas aquando do processo de obtenção de estruturas reticuladas. Para fazer isso, utilizou-se então a ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys* em dois modos, no modo *Static Structural* e Modal, com o intuito de no final conseguir-se comparar os resultados das microvigas otimizadas em ambos os modos e ver quais as melhores formas, qual o melhor método (estático ou modal) e ver quais as formas com mais rigidez e melhor relação de rigidez *versus* massa.

De referir que, a ferramenta da otimização topológica foi então utilizada para a realização da otimização pelo método estático das microvigas com 1 mm e 5 mm de espessura e para a realização da otimização pelo método modal das microvigas com 1 mm e 5 mm de espessura. De forma adicional, e com um propósito específico, que será mais à frente explicado, foi ainda realizada a otimização pelo método modal da microviga de 5 mm com uma massa concentrada. No total foram então obtidos 100 modelos de microvigas reticuladas otimizadas, dado terem sido feitas em cada estudo rotinas de otimização com iterações de 5% em 5%, mantendo um mínimo de 5% da massa original da microviga.

De maneira a demonstrar os processos numéricos realizados, serve de exemplo o primeiro caso que se efetuou. O primeiro estudo consistiu então em efetuar a otimização topológica da microviga com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão, com otimização no modo *Static Structural*. Definido já o material e a geometria da microviga procedeu-se à modelação. De salientar que, a modelação efetuada da microviga foi 2D, ou seja, o que se estudou foi um caso 2D, de uma placa.

O passo seguinte passou por gerar a malha, sendo este um passo essencial dado que quando se realiza uma simulação numérica por elementos finitos a malha apresenta um papel determinante, visto que, dependendo da quantidade e tamanho dos seus elementos pode-se obter resultados mais ou menos precisos. Posto isto, houve a necessidade então de refinar a malha com um elemento do tamanho de 0,1 mm de maneira a não comprometer os resultados aquando da remoção de material. O resultado deste refinamento encontra-se então apresentado na Figura 3.5.



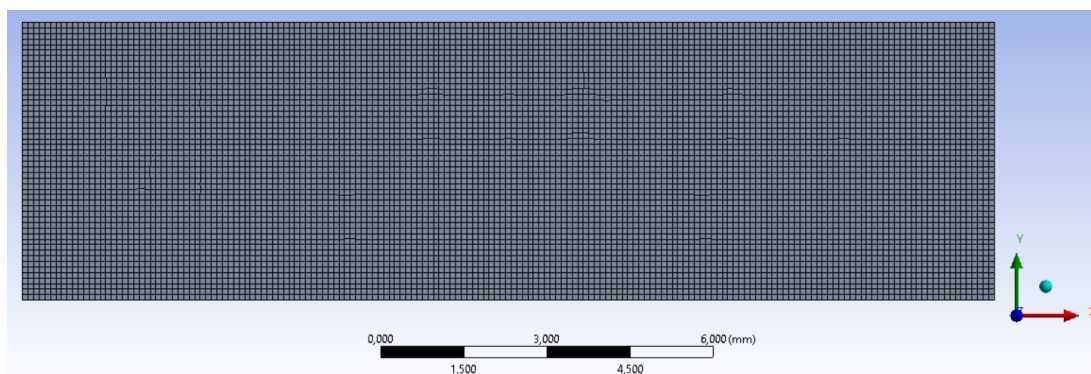


Figura 3.5 - Malha da microviga após refinamento de *element size* de 0,1 mm.

No que concerne à aplicação de constrangimentos e cargas, foi definido como suporte fixo a aresta esquerda e na aresta direita da microviga foi aplicada uma carga de 1 N, tal como se encontra evidenciado na Figura 3.6.

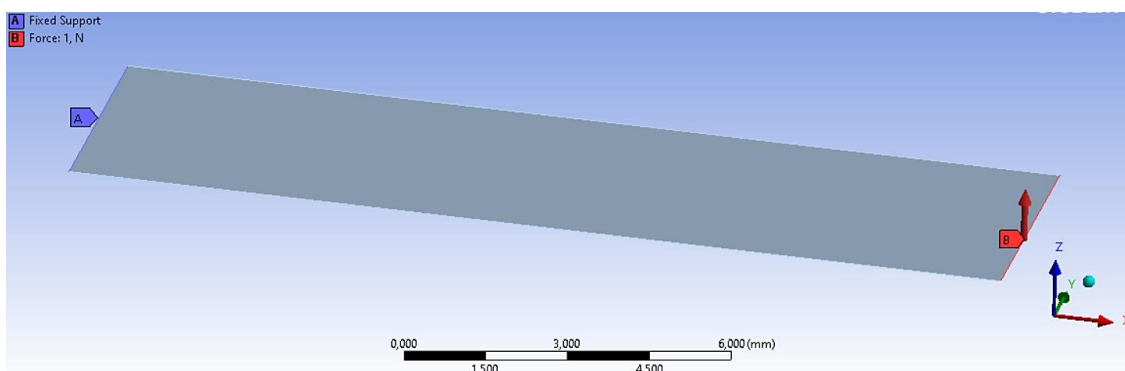


Figura 3.6 - Zona de aplicação de restrições e carga na microviga submetida a análise estática.

Por fim, selecionou-se o resultado pretendido, ou seja, de forma a conseguir saber a rigidez da microviga e, já sabendo que esta é obtida dividindo a força pelo deslocamento, selecionou-se a deformação, em mm, da microviga a fim de avaliar esta propriedade mecânica em estudo.

Depois de realizada a análise estática do componente alvo de estudo, procedeu-se à realização da sua otimização. Para tal, selecionou-se e arrastou-se a opção *Topology Optimization* até aos resultados da análise efetuada, uma vez que estes representam os parâmetros de entrada da otimização. Foi então necessário definir todas as partes do sistema de otimização topológica, ou seja, a zona de otimização, os objetivos da otimização e escolher o tipo de resposta.

No que concerne à zona de otimização, a região a ser otimizada é controlada através da definição das regiões de *design* e exclusão. Para o caso em análise, definiu-se o interior da microviga como região autorizada a ser otimizada e as arestas fronteiriças da peça foram definidas como região de exclusão,

estabelecendo-se assim estas como uma geometria fixa e que não podia ser otimizada pelo solucionador dada a importância de não alterar a superfície exterior da microviga.

A finalidade e a parte mais importante da otimização é a escolha do objetivo da mesma. Neste caso foi definido como objetivo minimizar a conformidade pelos motivos já anteriormente referidos e explicados.

Após definido o objetivo da simulação, foi necessário escolher o tipo de resposta que esta devia apresentar. Esta resposta desejada durante uma otimização pode ser controlada pelas suas restrições de resposta. Para restrições de massa ou volume existe uma opção para especificar a quantidade, em percentagem, a reter na região de *design*. No caso do estudo presente, como primeira otimização, foi escolhida então uma resposta em massa mantendo no mínimo 95% desta. De ressaltar que, a restrição também poderia ser de volume dado que os resultados dariam iguais.

Na Figura 3.7 encontra-se então explicitado todas as partes definidas do sistema de otimização topológica.

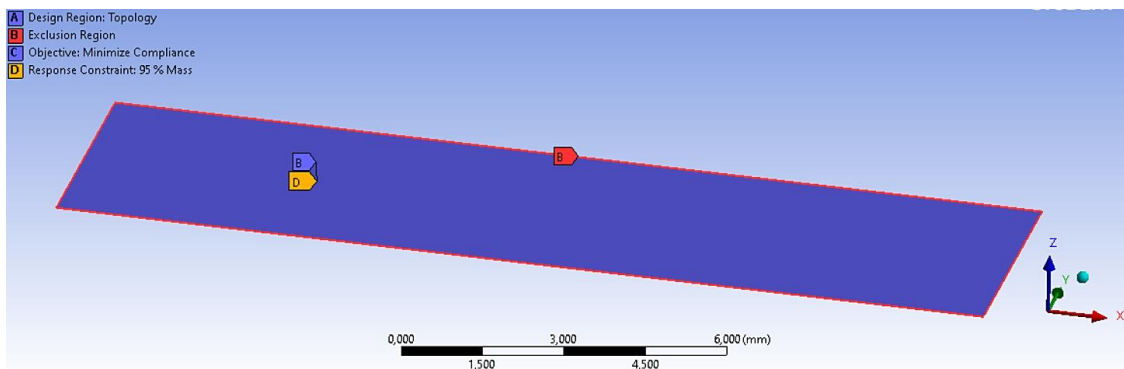


Figura 3.7 – Definição das partes do sistema de otimização topológica: zona de otimização e exclusão, objetivo da otimização e tipo de resposta estabelecidas na ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys*, submetida a análise estática.

De notar que, a otimização topológica da microviga com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão, com otimização no modo *Static Structural*, não foi realizada apenas com restrição de 95% da massa, tal como já foi mencionado. O que se fez foi fazer rotinas de otimização topológica, realizando assim um processo iterativo com o objetivo de ir reduzindo a massa à microviga, fazendo iterações de redução de 5% em 5%, mantendo um mínimo de 5% da massa original. Os resultados obtidos das formas destas microvigas encontram-se no Anexo A.

Este processo iterativo de percentagem de massa foi feito de maneira a visualizar o comportamento e ver então como variam as formas e a rigidez da microviga. Um excerto do procedimento efetuado no *Ansys* da obtenção da microviga com diferentes percentagens de massa encontra-se representado na Figura 3.8.

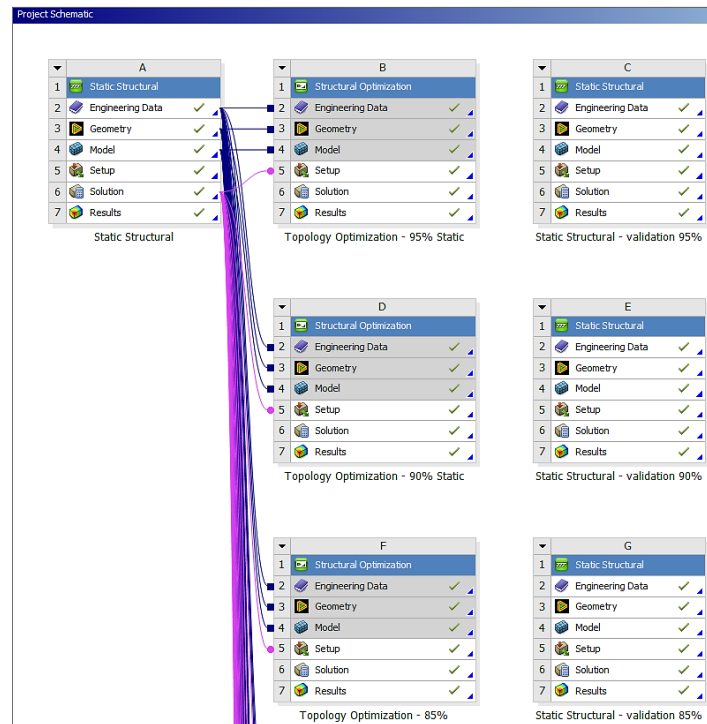


Figura 3.8 - Excerto da configuração do *Ansys Workbench* com as rotinas de otimização realizadas e, respetiva validação na coluna mais à direita.

Um aspeto crucial de referir é que, num caso normal, o procedimento de validação de uma estrutura seria direto e bastava somente ligar o resultado obtido da otimização topológica e inserir na geometria de uma nova análise estática de validação. Ou seja, o processo seria de forma semelhante ao esquematizado na Figura 3.9.

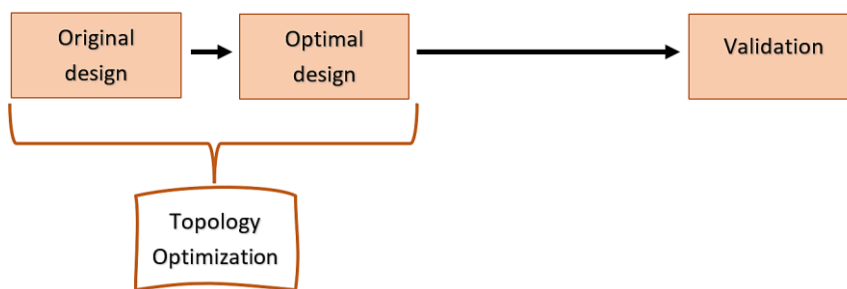


Figura 3.9 – Lógica de processo de otimização topológica e validação no *Ansys*.

No entanto, o *software Ansys* ainda tem uma lacuna dado que este processo só pode ser desencadeado com objetos tridimensionais. Ou seja, verificou-se que, uma vez que se estava a trabalhar com um caso 2D não se poderia seguir por esta abordagem. A solução por não se conseguir usar diretamente a geometria otimizada de cada microviga passou por exportar cada topologia em formato STL, que sai na forma de uma malha e usar o *software Inventor*, utilizando os contornos da malha para fazer *splines*, indo nó a nó, de forma a fazer uma “nova” microviga baseada no desenho da malha. Um

exemplo claro do que foi explicado encontra-se representado na Figura 3.10, onde se evidenciam esses contornos adicionados manualmente nó a nó.

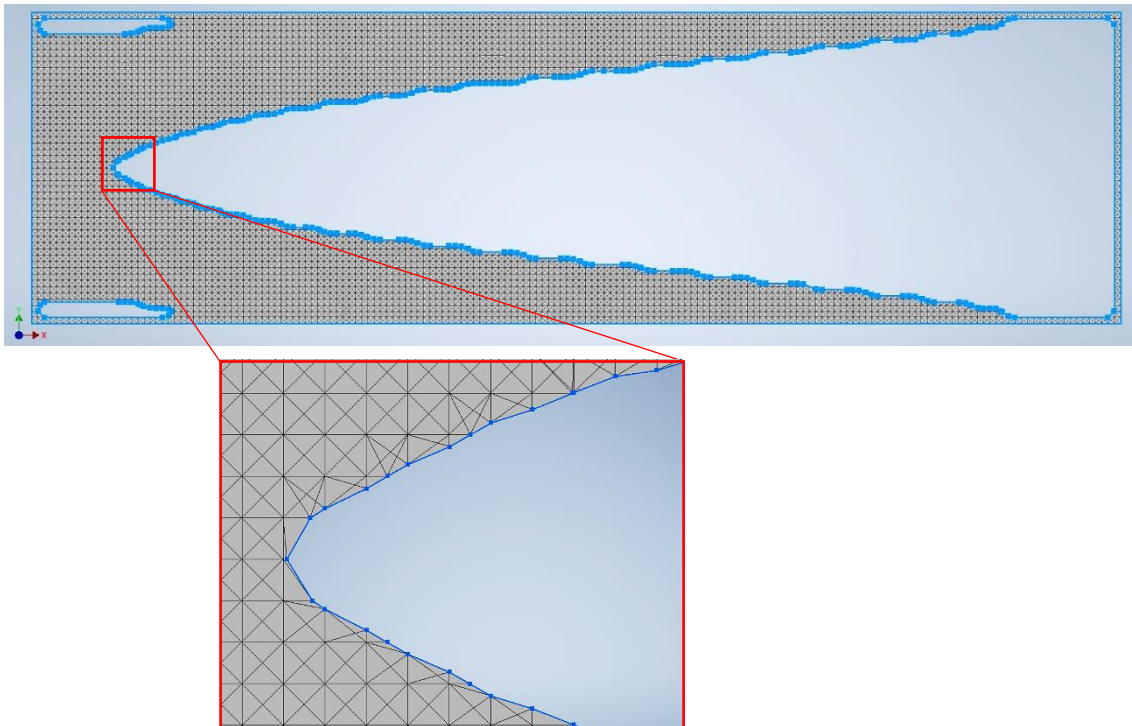


Figura 3.10 – Detalhe dos contornos de malha efetuados no *software Inventor* da topologia de uma microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural*.

Só após este processo é que cada microviga com a sua respetiva percentagem de massa pôde ser então exportada de novo para o *Ansys* e, fazer a análise estática estrutural de validação com a devida geometria. De forma esquemática, encontra-se então representada na Figura 3.11 uma representação sucinta do processo que foi necessário realizar em cada microviga otimizada.

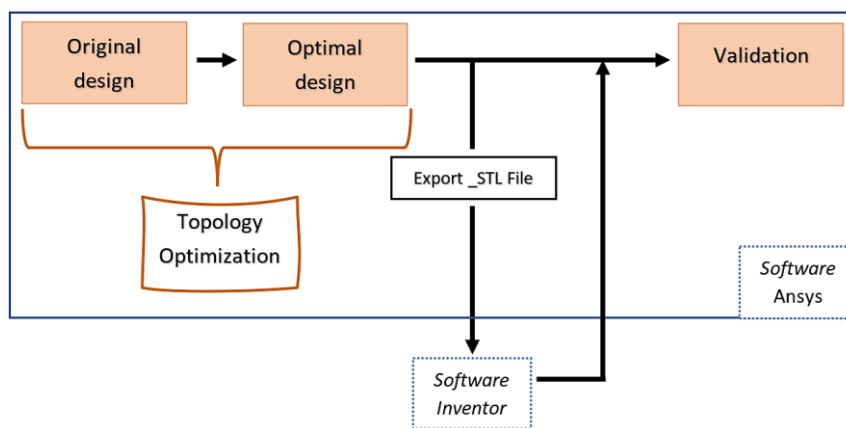


Figura 3.11 - Esquematização do processo necessário adotado para o reconhecimento do *Ansys* das geometrias otimizadas.

É importante de referir que este procedimento fundamental, realizado em todos os estudos, foi bastante moroso e exigiu muito tempo para a sua conclusão, dada a precisão e cuidado necessários e, só após a sua realização é que se conseguiu obter os resultados pretendidos de avaliação de rigidez.

Os resultados do primeiro estudo referido acima, da microviga com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão, com otimização no modo *Static Structural*, encontram-se no Anexo B. Neste anexo estão os resultados obtidos da microviga com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão, traduzidos em dois gráficos. Um é referente à variação dos valores de rigidez estática nas 20 microvigas reticuladas otimizadas e, um outro relativo à relação entre a rigidez e a massa destas microvigas de modo a detetar a existência de pontos ótimos onde se consegue ter o compromisso entre rigidez e massa e, obter bons resultados de rigidez com a menor massa possível. Portanto, houve assim a necessidade de construção deste tipo de gráfico para perceber a forma mais promissora deste estudo.

O segundo estudo, consistiu em efetuar a otimização topológica da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com otimização também no modo *Static Structural*. O procedimento da análise estática efetuada foi o mesmo diferindo apenas a orientação da aplicação da carga que, para este caso foi no eixo dos yy. Após a realização da análise estática da microviga, procedeu-se igualmente à realização da sua otimização. As partes que compõem o sistema de otimização topológica, ou seja, a zona de otimização, o objetivo da otimização e a escolha do tipo de resposta foram exatamente as mesmas do estudo anterior. De igual forma, também se procedeu a sucessivas iterações de redução mantendo um mínimo de 5% da massa original da microviga, ou seja, tal como no estudo anterior foram obtidas 20 microvigas reticuladas com diferentes percentagens de massa. Os resultados das formas das microvigas encontram-se no Anexo C.

Uma vez mais, houve a necessidade de exportar cada topologia para o *software Inventor* e só após este processo é que cada microviga com a sua respetiva percentagem de massa pôde ser exportada de novo para o *Ansys* e, fazer a análise estática estrutural de validação com a devida geometria.

Os resultados deste estudo, da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com otimização no modo *Static Structural*, encontram-se no Anexo D. Neste anexo estão os resultados reproduzidos em dois gráficos, um referente à variação dos valores de rigidez estática nas 20 microvigas reticuladas otimizadas e outro relativo à relação entre a rigidez e a massa destas microvigas.

Tal como já se referiu, para além de se ter utilizado a ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys* no modo *Static Structural*, também se utilizou no modo Modal.

A análise modal permite dar as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura. Os modos de vibração dizem então como a estrutura tende a deformar-se nas frequências naturais

específicas e quais as regiões que sofreriam tensões elevadas se a forma deformada fosse semelhante à forma modulada, sendo isto fatores úteis aquando da construção de uma estrutura.

De referir que, normalmente, as frequências mais altas são consideradas menos importantes na análise dinâmica de elementos finitos. Em primeiro lugar, é difícil, utilizando o método dos elementos finitos, calcular os valores exatos num sistema estrutural contínuo que tem um número infinito de graus de liberdade e, além disso, as frequências mais altas podem não ter qualquer significado prático em grandes sistemas de elementos finitos quando as estruturas reais não vibram com essas frequências altas [155].

No que respeita então ao caso concreto do presente trabalho, as microvigas com 1 mm e 5 mm, foi efetuada a otimização topológica da microviga com 1 mm e 5 mm de espessura, ambas com otimização no modo Modal. De notar que, o processo entre o terceiro e quarto estudos de 1 mm e 5 mm, respetivamente, foi igual. O que diferiu foram os resultados obtidos dada a diferenças das espessuras e, como tal, será apenas feita uma breve abordagem de um caso.

Assim, o terceiro estudo, consistiu em efetuar a otimização topológica da microviga com 1 mm de espessura, com otimização no modo Modal.

Para a realização da análise modal houve previamente a necessidade de introduzir as propriedades, uma vez mais, da liga A356.

No que concerne à geração da malha e ao seu refinamento, foram usados o mesmo tipo de malha e refinamento que nos estudos realizados pelo método estático.

Quanto à aplicação de constrangimentos e cargas, foi definido como suporte fixo a aresta esquerda e não foi aplicada qualquer carga, dado que se pretendeu averiguar os modos de vibração livres da microviga. Na Figura 3.12 encontra-se então evidenciada a aplicação do constrangimento.

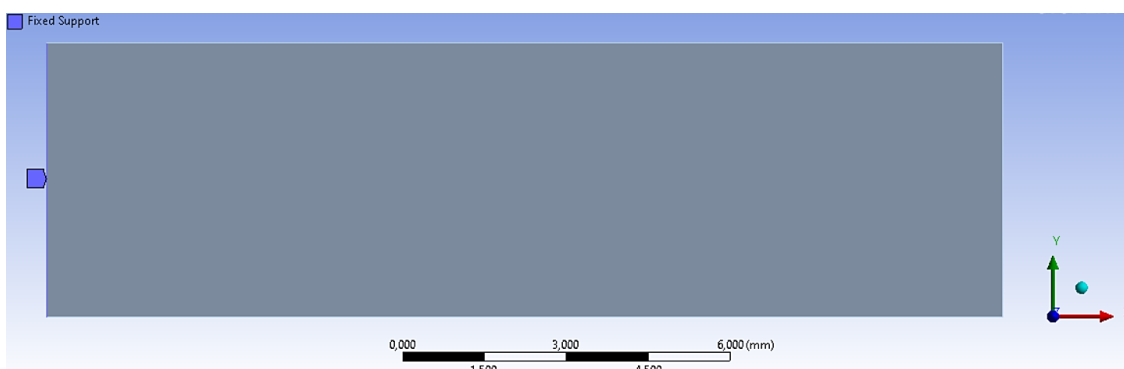


Figura 3.12 - Zona de aplicação de restrições e carga na microviga submetida a análise modal.

Depois de realizada a análise modal da microviga, onde se pretendeu analisar particularmente o primeiro modo de vibração da microviga, procedeu-se à realização da sua otimização.

Foi então necessário definir todas as partes do sistema de otimização topológica, ou seja, a zona de otimização, os objetivos da otimização e escolher o tipo de resposta.

No que concerne à zona de otimização, definiu-se uma vez mais o interior da microviga como região autorizada a ser otimizada e as arestas fronteiriças da peça foram demarcadas como região de exclusão.

A finalidade e a parte mais importante da otimização é a escolha do objetivo da mesma. Neste caso diferiu das análises estáticas previamente abordadas. Foi definido como objetivo maximizar a frequência natural de forma a maximizar a rigidez dinâmica, tal como comprovado pela fórmula da frequência natural angular de um sistema.

Após definido o objetivo da simulação, foi necessário escolher o tipo de resposta que esta devia apresentar. No caso de estudo presente, tal como os anteriores foi escolhida então uma resposta em massa mantendo no mínimo 95% desta, na primeira iteração.

Na Figura 3.13 encontra-se então explicitado todas as partes definidas do sistema de otimização topológica.

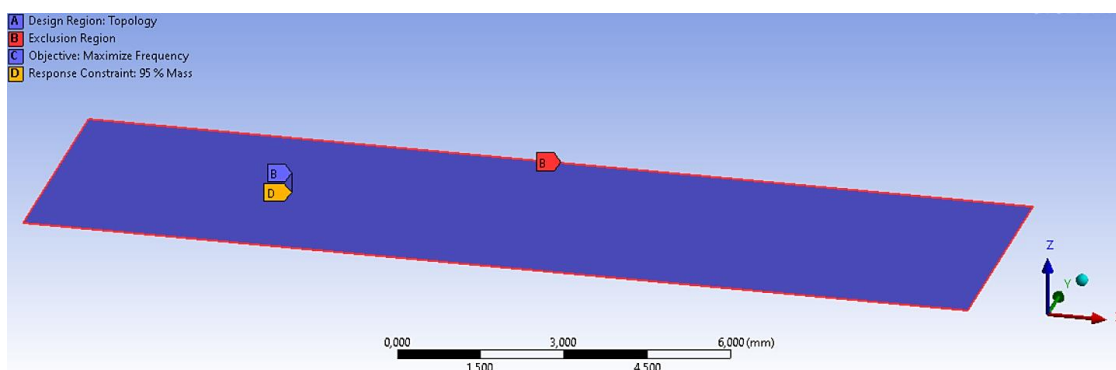


Figura 3.13 - Definição das partes do sistema de otimização topológica: zona de otimização e exclusão, objetivo da otimização e tipo de resposta estabelecidas na ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys*, submetida a análise modal.

Fizeram-se igualmente as rotinas de otimização topológica, com as mesmas iterações, iterações de redução de 5% em 5%, mantendo um mínimo de 5% da massa original. Os resultados das microvigas encontram-se no Anexo E.

Uma vez mais, por se tratar de um estudo 2D teve-se de exportar cada topologia e usar o *software Inventor*, de maneira a fazer uma “nova” microviga baseada no desenho da malha. Só após este processo é que cada microviga com a sua respetiva percentagem de massa pôde ser exportada de novo para o *Ansys* e, fazer a análise modal de validação para avaliar a rigidez dinâmica.

Os resultados deste estudo, da microviga com 1 mm de espessura, com otimização no modo Modal, encontram-se no Anexo F. Neste anexo estão os resultados reproduzidos em dois gráficos, um

referente à variação dos valores de rigidez dinâmica nas 20 microvigas reticuladas otimizadas e, um outro relativo à relação entre a rigidez e a massa destas microvigas.

Relativamente ao caso da microviga com 5 mm, como já se mencionou anteriormente, fez-se também a otimização no modo Modal e, este quarto estudo foi feito de igual modo ao da microviga com 1 mm. Os resultados obtidos das 20 microvigas otimizadas encontram-se no Anexo G. Já os resultados de avaliação da rigidez dinâmica de cada microviga otimizada encontram-se no Anexo H.

Através da análise das microvigas otimizadas pelo método modal com 1 mm e 5 mm de espessura observou-se que, entre estes dois casos, existem topologias mais interessantes ao nível do arranjo estrutural nas zonas reticuladas, nas microvigas otimizadas com 5 mm de espessura.

Como tal, um estudo adicional ao anterior, em que se fez a otimização no modo Modal, passou por realizar uma nova análise dinâmica com a microviga de 5 mm de espessura, mas simulando com uma massa concentrada. Esta análise foi considerada em virtude de a colocação desta massa poder fornecer microvigas otimizadas ainda com um melhor arranjo estrutural, dado que no caso de 5 mm sem massa concentra a remoção de material era muito concentrada junto da extremidade livre da microviga e, como tal, a sua colocação poderia levar a uma melhor distribuição de material.

Fez-se então este estudo de otimização topológica da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal, com a tal massa concentrada. Para a realização da análise modal houve previamente a necessidade de introduzir as propriedades, uma vez mais, da liga A356.

O que diferiu neste estudo foi então o acréscimo de uma massa concentrada de 1 Kg na geometria da microviga, na aresta oposta à do suporte fixo, tal como se observa na Figura 3.14.

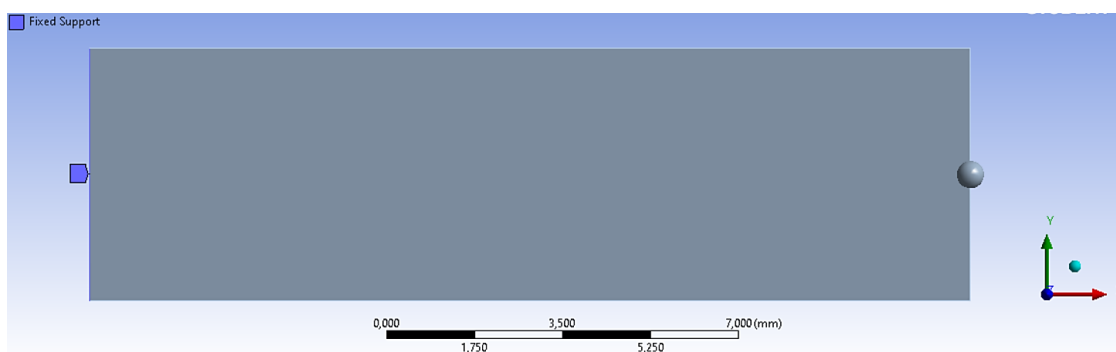


Figura 3.14 - Zona de aplicação de colocação da massa de 1 Kg na microviga submetida a análise modal.

No que concerne aos restantes parâmetros da análise modal, a malha e ao seu refinamento, foram os mesmo que nos estudos realizados anteriormente. Quanto à aplicação de constrangimentos e cargas, tal como nos outros estudos com a otimização pelo método modal, foi definido como suporte fixo a aresta esquerda e não foi aplicada qualquer carga.



Depois de realizada a análise modal da microviga, onde se pretendeu analisar particularmente o primeiro modo de vibração da microviga, procedeu-se à realização da sua otimização.

As partes do sistema de otimização topológica definidas, ou seja, a zona de otimização, os objetivos da otimização e a escolha do tipo de resposta foram, uma vez mais, iguais às dos dois estudos anteriores.

Fizeram-se de igual modo as rotinas de otimização topológica, com as mesmas iterações, iterações de redução de 5% em 5%, mantendo um mínimo de 5% da massa original e os resultados das microvigas encontram-se presentes no Anexo I.

Novamente, teve-se de exportar cada topologia e usar o *software Inventor*. Só após este processo é que cada microviga com a sua respetiva percentagem de massa pôde ser exportada de novo para o *Ansys* e, fazer a análise modal de validação para avaliar a rigidez dinâmica.

Os resultados deste estudo, da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, encontram-se no Anexo J. Neste anexo estão os resultados reproduzidos em dois gráficos, um referente à variação dos valores de rigidez dinâmica nas 20 microvigas reticuladas otimizadas e, um outro relativo à relação entre a rigidez e a massa destas microvigas.

Após a realização de todas estas análises, procedeu-se ao objetivo crucial que era avaliar qual o método, estático ou modal, que permitia obter melhores formas e resultados de rigidez. No entanto, esta comparação não é direta, uma vez que, não é comparável por exemplo os resultados da microviga de 1 mm com otimização pelo método estático e modal, pois quando se analisa as microvigas tem de se averiguar se é um caso estático ou dinâmico visto que, a rigidez estática não é o mesmo que rigidez dinâmica.

Como tal, para fazer a avaliação e posterior comparação dos valores de rigidez estática das microvigas com 1 mm e 5 mm otimizadas no modo Modal, houve a necessidade de inserir as microvigas otimizadas pelo método modal em análises estáticas para, desta forma, se conseguir comparar estes resultados com as microvigas com 1 mm e 5 mm otimizadas pelo método estático. Além disso, e uma vez se ter efetuado as otimizações no modo Modal com uma massa concentrada na extremidade livre da microviga com 5 mm de espessura, por forma a estudar a influencia da adição de massa concentrada na melhoria de resultados, inseriu-se igualmente estas microvigas otimizadas em análises estáticas de forma a aferir se a colocação desta massa concentrada poderia propiciar melhores resultados ao nível da rigidez estática quando comparado com as microvigas com 5 mm otimizadas pelo método estático.

Da mesma forma, para avaliar os valores de rigidez dinâmica tanto das microvigas com 1 mm e 5 mm otimizadas no modo *Static Structural*, houve a necessidade de inserir estas microvigas otimizadas

pelo método estático em análises modais, para ser possível comparar os resultados com as microvigas com 1 mm e 5 mm otimizadas pelo método modal.

Estes resultados que efetivamente traduzem um dos principais propósitos do trabalho, encontram-se presentes no Subcapítulo 4.1 referente aos Resultados e discussão de rotinas numéricas onde serão analisados e detalhados.

Uma nota à parte do que foi acima dito importante de referir é que, pese embora tenham sido feitas rotinas de otimização com iterações de 5% em 5%, esses valores desviaram-se com tolerâncias até cerca de 5%. Isto acontece porque o *software Ansys* não consegue cumprir, talvez só com muitas iterações é que conseguia, mas aí o esforço computacional seria demasiado. Isto não afeta em nada o trabalho porque trabalhou-se sempre com as percentagens reais, mas serve de explicação para o facto de nos Subcapítulos 4.1 e 4.2 de apresentação e discussão dos resultados numéricos se verificar alguns valores de percentagens de microvigas que diferem dos valores terminados em 5 e 0.

#### Problemas associados à fabricação das microvigas

Como se sabe, a otimização topológica é utilizada amplamente em produtos industriais, tais como automóveis, comboios e aviões, visto ser uma poderosa ferramenta de *design* para obter soluções criativas de *design* com elevado desempenho. Todavia, estas soluções obtidas por otimização topológica requerem um processo de interpretação, tendo em consideração o processo de fabrico das mesmas. Desta forma, uma das considerações mais importantes no processo de otimização do *design* passa por considerar a necessidade de limitação da espessura [156].

Esta questão torna-se então bastante pertinente e, embora no presente trabalho se tenha achado inicialmente que não haveria problemas associados à espessura das zonas reticuladas obtidas, isso não se verificou. Numa primeira tentativa de produção verificou-se a impossibilidade de as produzir devido à existência de microvigas com a espessura das suas treliças com 0,1 mm ou um valor ainda inferior.

Ou seja, nos estudos anteriores, não se considerou nos parâmetros a definir a questão de restrição de fabricação, como tal, houve a necessidade de o fazer nestes novos estudos realizados, de forma a conseguir atingir mais um objetivo do trabalho, a produção das microvigas. Definiu-se então como restrição 0,3 mm de espessura, valor este aparentemente possível, tendo em consideração histórico de projetos já feitos com esta espessura.

Dado que já se tinham realizado muitos estudos e, de forma a acelerar a obtenção de novos resultados face ao tempo ainda disponível, o que se decidiu foi para estes novos estudos, considerando a restrição de fabricação, estudar apenas a microviga com 5 mm de espessura, dado que esta ao longo

dos estudos anteriores realizou topologias mais interessantes do ponto de vista de topologia do que a microviga com 1 mm.

Ou seja, a ferramenta da otimização topológica foi então utilizada para a realização da otimização pelo método estático da microviga com 5 mm de espessura e para a realização de otimização pelo método modal da microviga 5 mm de espessura. De forma adicional, e com o mesmo propósito já explicado, foi ainda realizada a otimização pelo método modal da microviga de 5 mm com uma massa concentrada. No total destes estudos, com restrição de fabrico, foram então obtidos 51 modelos de microvigas reticuladas otimizadas, dado terem sido feitas as rotinas de otimização com iterações de 5% em 5%, mantendo um mínimo agora de 20% da massa original da microviga, cuja explicação será feita a seguir.

O processo da otimização topológica da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com otimização no modo *Static Structural*, sucedeu-se exatamente da mesma forma que o estudo da microviga de 5 mm com otimização no modo *Static Structural*, sem restrição de espessura. A única diferença aconteceu na parte da otimização. A zona de otimização, o objetivo da otimização e a escolha do tipo de resposta foram exatamente as mesmas, no entanto, teve-se em conta o parâmetro das restrições de fabrico. Isto é, teve-se o cuidado de aplicar uma restrição de fabricação, de forma a evitar que a otimização topológica criasse regiões muito pequenas para a produção. O parâmetro associado a esta restrição e o valor definido encontram-se assinalados na Figura 3.15 à esquerda. Além disso, como por defeito a região definida com “*Min Member size*” não inclui a região de exclusão, houve a necessidade de alterar esse parâmetro também, visível na Figura 3.15 à direita.

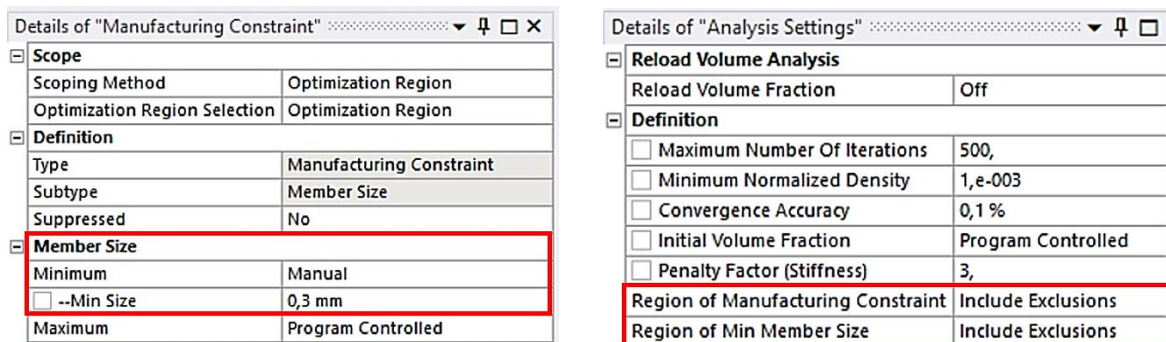


Figura 3.15 – Detalhes da aplicação do parâmetro de restrição de fabricação do sistema de otimização topológica, à esquerda e, inclusão das arestas com restrição de 0,3 mm, à direita.

De igual forma, procedeu-se a sucessivas iterações de redução mantendo um mínimo de 20% da massa original da microviga, ou seja, foram obtidas 17 microvigas reticuladas com diferentes percentagens de massa. De ressaltar que se realizaram as otimizações até idealmente 20% da massa

original da microviga porque tanto nos 25% como nos 20% na análise estática todas as treliças já tinham menos de 0,3 mm de espessura e, inclusive nestes casos houve a necessidade de acrescentar material aquando da realização dos contornos da malha no *software Inventor*. O que acontece é que o programa possivelmente entrou em conflito pois, por um lado queria tirar material, mas por outro lado, queria manter a restrição estabelecida. Os resultados das formas das microvigas otimizadas encontram-se no Anexo L.

Exportou-se igualmente cada topologia para o *software Inventor* e após este processo é que cada microviga com a sua respetiva percentagem de massa pôde ser exportada de novo para o *Ansys* e, fazer a análise estática estrutural de validação com a devida geometria. Mas, neste caso houve uma particularidade que ainda tornou mais moroso o processo, que foi a necessidade de verificação e, se necessária retificação, da dimensão da espessura de treliças.

Os resultados deste estudo, da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com otimização no modo *Static Structural*, encontram-se no Anexo M. Neste anexo estão os resultados reproduzidos em dois gráficos, um referente à variação dos valores de rigidez estática nas 17 microvigas reticuladas otimizadas e, um outro relativo à relação entre a rigidez e a massa destas microvigas.

Quanto ao processo da otimização topológica da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal, sucedeu-se exatamente da mesma forma que o estudo da microviga de 5 mm com otimização no modo Modal, sem restrição de espessura. Os aspetos fulcrais a ter conta são os mesmos que foram mencionados anteriormente, no que concerne à restrição de fabricação e, nesta análise modal, também se realizaram as otimizações até idealmente 20% da massa original da microviga. Houve similarmente a necessidade de verificação e, se necessária retificação, da dimensão da espessura de treliças de cada topologia no *software Inventor*.

Os resultados das formas das microvigas otimizadas encontram-se no Anexo N e os resultados obtidos de rigidez dinâmica, da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal com esta restrição de fabrico encontram-se no Anexo O.

Por último, em relação ao processo da otimização topológica da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal, com a massa concentrada sucedeu-se exatamente da mesma forma que o estudo sem a restrição de fabrico. Aplicou-se igualmente a restrição de fabricação e, também se realizaram as otimizações até idealmente 20% da massa original da microviga. Houve igualmente a necessidade de verificação e, se necessária retificação, da dimensão da espessura de treliças de cada topologia no *software Inventor*.

Os resultados das formas das microvigas otimizadas encontram-se no Anexo P e os resultados obtidos de rigidez dinâmica, da microviga com 5 mm de espessura, com otimização no modo Modal com massa concentrada e a restrição de fabrico encontram-se no Anexo Q.

Após a realização destas análises, procedeu-se uma vez mais ao objetivo de avaliar qual o método, estático ou modal, que permitia obter melhores formas e resultados de rigidez. No entanto, tal como já foi referido esta comparação não é direta.

Como tal, para fazer a avaliação e posterior comparação dos valores de rigidez estática da microviga com 5 mm otimizadas no modo Modal, houve a necessidade de inserir as microvigas otimizadas pelo método modal em análises estáticas para se conseguir comparar os resultados com as microvigas com 5 mm otimizadas pelo método estático. Além disso, e uma vez ter-se efetuado as otimizações no modo Modal com uma massa concentrada na microviga com 5 mm de espessura inseriu-se igualmente estas microvigas otimizadas em análises estáticas de forma a comparar com as microvigas com 5 mm otimizadas pelo método estático.

Da mesma forma, para avaliar os valores de rigidez dinâmica da microviga com 5 mm otimizadas no modo *Static Structural*, houve a necessidade de inserir estas microvigas otimizadas pelo método estático em análises modais, para ser possível comparar os resultados com as microvigas com 5 mm otimizadas pelo método modal.

Ou seja, o procedimento foi exatamente o mesmo ao realizado nos estudos em que não se considerou o aspeto da fabricação.

Estes resultados que efetivamente traduzem um dos principais propósitos do trabalho, encontram-se presentes no Subcapítulo 4.2 referente aos Resultados e discussão de rotinas numéricas com restrição de espessura.

### 3.2. METODOLOGIA DE FABRICAÇÃO

Para a produção das microvigas reticuladas, tal como já foi mencionado, escolheu-se o processo de fundição por modelo perdido assistido por fabrico aditivo. Ou seja, teve-se como objetivo no atual trabalho apresentar geometrias de microvigas treliçadas metálicas produzidas através da fabricação de modelos poliméricos por FA, seguidos da fundição por modelo perdido da liga de alumínio A356.

A Figura 3.16 mostra de forma esquematizada a técnica híbrida proposta, que consiste na combinação de impressão 3D e de fundição por modelo perdido. Os modelos CAD definidos foram utilizados como referência para produzir os modelos em resina através da técnica estereolitografia. Após isto, estes modelos atuaram como molde para o molde de gesso e, posteriormente este foi preenchido com o alumínio fundido para produzir as microvigas reticuladas metálicas.

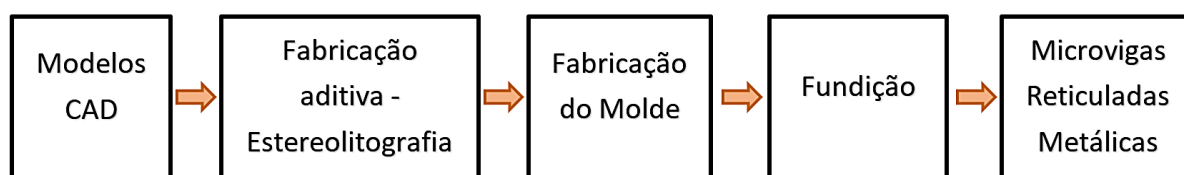


Figura 3.16 - Representação das etapas da técnica de fabricação proposta: fundição por modelo perdido assistido por fabrico aditivo.

#### 3.2.1. SELEÇÃO DAS MICROVIGAS OTIMIZADAS – MODELOS CAD

Para proceder à fabricação das microvigas reticuladas, foram tidas em conta para produção, as microvigas otimizadas obtidas a partir dos estudos considerados com o parâmetro de restrição de fabrico. Ou seja, os estudos realizados com a microviga de 5 mm espessura com otimização pelo método estático, modal e, ainda, com a otimização pelo método modal com uma massa concentrada. Como tal, após analisadas as melhores formas das microvigas reticuladas, tendo por base a análise da relação de  $K/m$  que estas apresentaram, procedeu-se à seleção das mesmas.

De referir que, embora tenha sido efetuada a otimização pelo método modal da microviga de 5 mm com uma massa concentrada, na análise modal com a massa concentrada não se selecionou nenhuma forma para produção. Isto porque, uma vez que, não se iria conseguir realizar futuros ensaios mecânicos no DMA com uma massa colocada de 1 kg não se justificava a sua fabricação. Ou seja, os modelos das microvigas selecionadas para produção foram apenas as topologias da microviga de 5 mm espessura com otimização pelo método estático e modal.

Assim, no que concerne aos resultados da otimização pelo modo *Static Structural*, atendendo aos resultados presentes no Anexo M, averiguou-se pelo gráfico da relação de  $K/m$  que, a forma mais

promissora deste estudo era a topologia da microviga com a iteração dos 40%, referente a uma percentagem real de 44% da massa original da microviga. Esta topologia já modelada e pronta a fabricar com as duas partes externas, encontra-se representada na Figura 3.17.

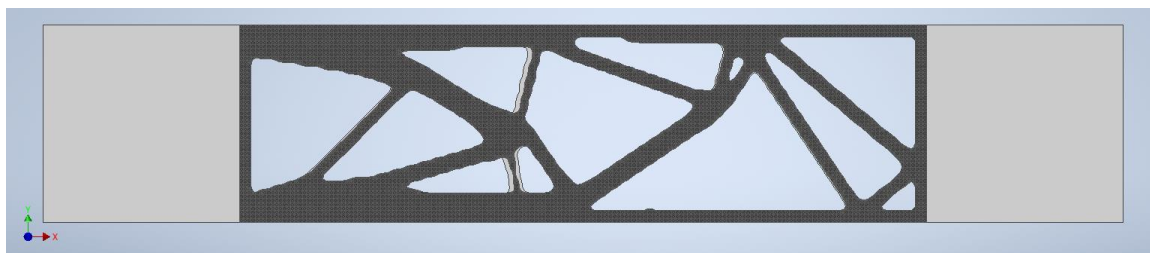


Figura 3.17 – Modelação da microviga de 5 mm otimizada com 44%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura.

Já no que diz respeito ao estudo dinâmico, através dos resultados presentes no Anexo O, demonstrou-se pelo gráfico da relação de  $K/m$  que, a forma mais promissora desta análise era a topologia da microviga com a iteração dos 65%, referente a uma percentagem real de 68% da massa original da microviga. Esta topologia já modelada e preparada para ser produzida com as duas partes externas, encontra-se representada na Figura 3.18.

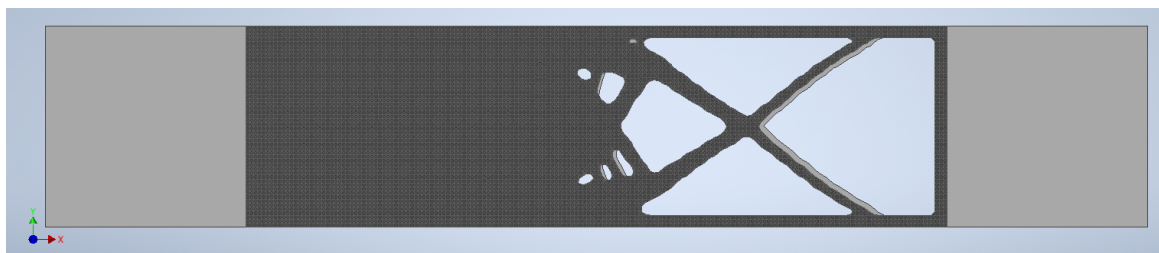


Figura 3.18 - Modelação da microviga de 5 mm otimizada com 68%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

### 3.2.2. PROCESSO DE FABRICO DOS MODELOS POLIMÉRICOS

A primeira etapa do processo passou então pela fabricação dos modelos poliméricos recorrendo à estereolitografia, tecnologia esta associada à técnica *vat photopolymerization*.

Tal como já foi mencionado e descrito no estado de arte, a técnica *vat photopolymerization* é uma das técnicas mais populares de fabricação aditiva no qual um fotopolímero líquido é armazenado no interior de um depósito, dada a necessidade de o processo ocorrer num ambiente controlado, sendo seletivamente curado através de um processo de polimerização ativado com luz visível ou radiação ultravioleta (UV).

Dependendo do método de cura a técnica *vat photopolimerization* tem vários processos específicos associados, sendo um deles a tecnologia de estereolitografia (SLA), em que utiliza uma fonte laser para iniciar a reação de polimerização

A SLA utiliza então fotopolímeros/resinas fotoendurecíveis como materiais de trabalho para a fabricação. A sua capacidade de cura sob luz UV ou laser é utilizada para a construção de peças 3D de formas complexas [157]. A luz UV é direcionada e apontada com precisão na resina e cria uma camada sólida da forma desejada por fotopolimerização. Depois de criar uma primeira camada, a plataforma é movida a uma altura equivalente à espessura da camada, e a resina não curada é espalhada sobre a camada inicialmente criada [157]. A repetição da polimerização para as camadas subsequentes da forma desejada permite assim construir um componente 3D sobre a plataforma. De notar que, a precisão da produção de SLA está relacionada com o diâmetro do feixe laser no ponto de cura, nomeadamente, a área do feixe de laser [79]. Este tipo de impressão permite reproduzir características finas, bom acabamento superficial e exatidão final da peça [80].

Para a produção das microvigas em estudo usou-se assim a estereolitografia com resina para fundição. Os modelos foram assim fabricados com resina recorrendo à impressora *3D Systems FabPro 1000*, representada na Figura 3.19, que possui um processo esteriolitografico ascendente e uma espessura de camada que pode ir de 30 a 50  $\mu\text{m}$ , sendo que para o trabalho foi de 30  $\mu\text{m}$ .

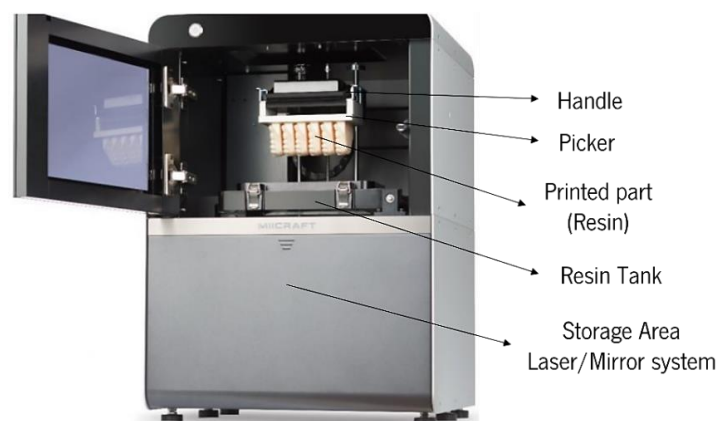


Figura 3.19 - Impressora 3D Systems FabPro1000.

Após todo o processo associado ao fabrico dos modelos pela técnica SLA houve a necessidade de remoção dos suportes de sustentação e lixar as pequenas rugosidades devidas à remoção dos mesmos.

De notar que, por forma a assegurar qualquer problema que pudesse surgir ao longo do processo de fabricação foram impressas 4 microvigas que foram otimizadas pelo método estático e, 5 microvigas reticuladas que foram otimizadas pelo método modal.



Assim, uma microviga otimizada pelo método estático encontra-se representada na Figura 3.20, onde se mostra a peça em diversos ângulos para ter uma melhor percepção da sua dimensão, geometria e qualidade de impressão obtida.

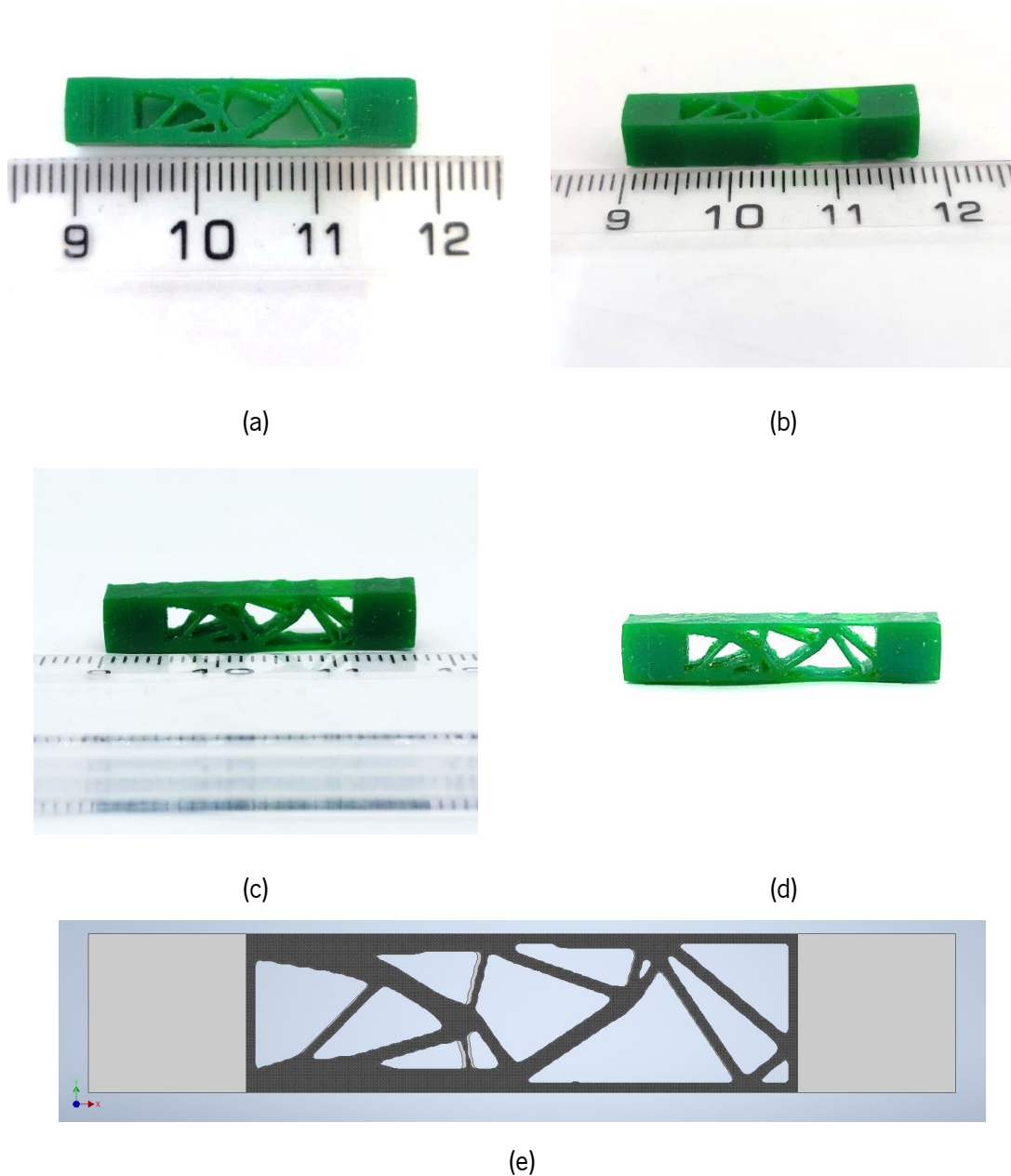


Figura 3.20 - Fotos da microviga reticulada otimizada pelo método estático, obtida pelo processo de fabrico SLA, demonstrado em (a), (b), (c) e (d) e o modelo CAD tido como base em (e).

Por sua vez, na Figura 3.21 encontra-se uma microviga otimizada pelo método modal, onde se mostra igualmente a peça em diversos ângulos para ter uma melhor percepção das suas características, nomeadamente da sua dimensão, geometria e qualidade.

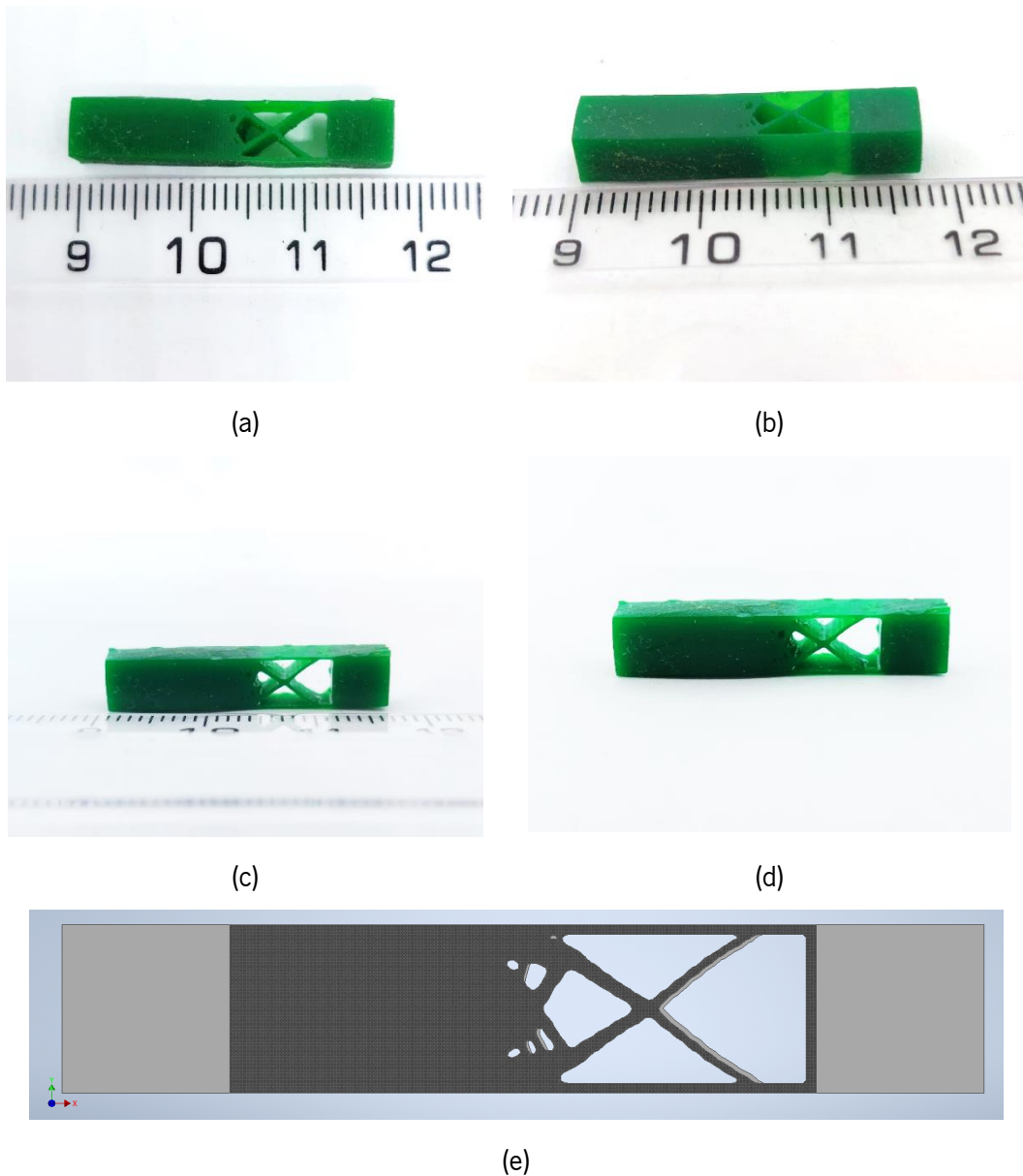


Figura 3.21 - Fotos da microviga reticulada otimizada pelo método modal, obtida pelo processo de fabrico SLA, demonstrado em (a), (b), (c) e (d) e o modelo CAD tido como base em (e).

### 3.2.3. PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Uma vez produzidos os modelos poliméricos, iniciou-se o processo propriamente dito de fundição por modelo perdido, que no fundo é uma variante do processo de fundição por cera perdida. No processo convencional de fundição por cera perdida, tal como já foi referido no capítulo do estado de arte, a produção dos moldes é a partir de uma cera ou polímero volátil. Estes moldes são imersos num banho de pasta cerâmica, o que gera um revestimento cerâmico sobre o molde. Depois disso, os moldes são secos e concluída esta etapa de secagem, a descerificação é feita por fusão ou volatilização e, em seguida, é feito o vazamento preenchendo o molde vazio com metal líquido [158]. Após o vazamento e arrefecimento dos fundidos, o produto final é obtido através da remoção do revestimento cerâmico. Este

método convencional é conhecido pela sua capacidade de produzir componentes com excelente acabamento superficial, precisão dimensional e formas complexas [159].

No fundo, o que difere para o presente trabalho é que os modelos são poliméricos e não em cera e estes foram submersos em gesso líquido e, evaporando gravaram os detalhes no molde cerâmico. Assim, nos próximos subcapítulos é explicado mais ao detalhe todo este processo efetuado.

### 3.2.3.1. FORMAÇÃO DAS MOLDAÇÕES

O primeiro passo crucial realizar foi proceder ao cálculo de alumínio necessário para produzir as microvigas e, verificar se era viável dada a capacidade máxima do cadinho (~22 g). Para tal, foi pesada cada microviga na balança, tal como se observa na Figura 3.22, de forma a avaliar qual era o valor máximo associado a uma microviga tomando-se como referência esse maior valor de massa para os cálculos.



Figura 3.22 - Balança utilizada para proceder à pesagem de cada microviga.

Constatou-se que o maior valor de massa de microviga era de 0,738 g, mas por forma a assegurar que não haveria problemas assumiu-se um valor de 0,9 g. Assim, uma vez que a densidade da resina é  $1,0 \text{ g/cm}^3$  e a do alumínio é de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  calculou-se que seriam necessárias 2,4 g de alumínio por cada microviga.

Já no que concerne aos cachos pensados utilizar, sabendo que a massa de cada cacho em PLA era de 1,3 g e as densidades de PLA  $1,4 \text{ g/cm}^3$  e de alumínio  $2,7 \text{ g/cm}^3$  calculou-se a massa de alumínio necessário para cada cacho que fez um valor de 2,5 g por cacho. A configuração de cacho produzido em PLA utilizado encontra-se representado na Figura 3.23.



Figura 3.23 - Cacho com 4 ramificações produzido em PLA.

Assim, inicialmente tinha-se ponderado unir a cada cacho quatro microvigas e produzir as quatro de uma só vez o que tornaria necessário 12,1 g de alumínio.

No entanto, dada a quantidade de alumínio que se havia cortado, 15 g, preferiu-se, para promover pressão metaloestática durante o enchimento, colocar apenas 2 microvigas em cada cacho perfazendo uma quantidade necessária de 7,3 g de alumínio. De notar que, para realizar a união do cacho com as duas microvigas foi utilizada e derretida cera. As microvigas unidas a cada cacho encontram-se representadas na Figura 3.24.

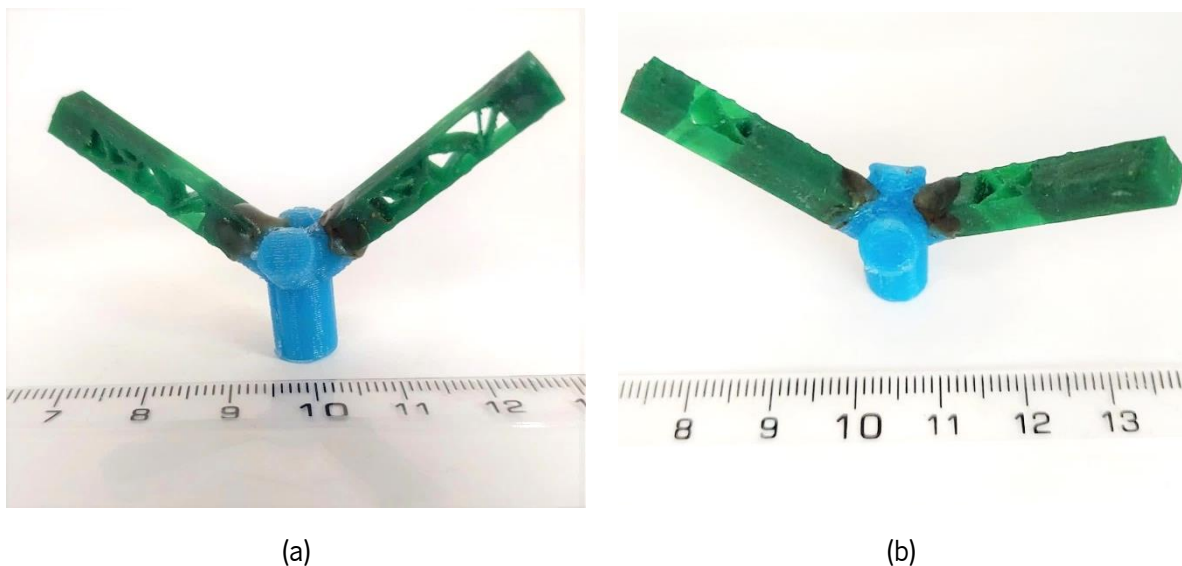


Figura 3.24 – Modelos de sacrifício: (a) união das 2 microvigas otimizadas pelo método estático ao cacho, (b) união das 2 microvigas otimizadas pelo método modal ao cacho.

De ressaltar que, tal como se observa pela Figura 3.24, cada uma das microvigas associada ao cacho foi colocada em duas posições diferentes para testar e avaliar qual a melhor solução aquando do processo de verter o alumínio fundido.

Para além do mais, foi ainda feita a técnica de união de uma microviga ligada diretamente com ramificação única, tal como se observa na Figura 3.25.

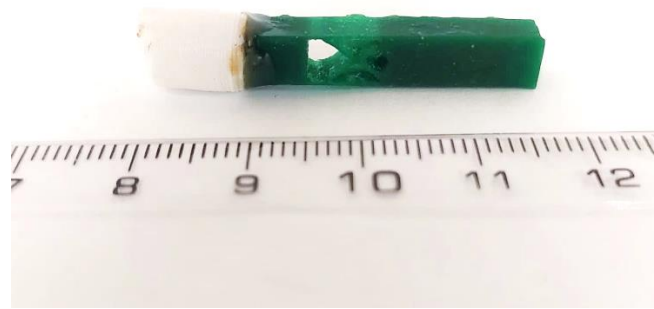


Figura 3.25 – Modelo de sacrifício: ramificação única de microviga otimizada pelo método modal.

Apesar das construções acima efetuadas, pensou-se que dada as zonas reticuladas tão finas e complexidade geométrica das microvigas uma técnica que poderia ser testada seria inserir microcanais. Ou seja, de forma a garantir que o processo de fundição não teria problemas decidiu testar-se outra forma de fabricar as microvigas em alumínio. Pensou-se assim, fazer de novo a união com cera entre cada cacho e as respetivas microvigas, mas inserir nas duas ramificações livres de cada um dos cachos uma ligação às microvigas com microcanais de PLA. Este raciocínio foi então tido em consideração de forma a garantir que o alumínio conseguia chegar à outra zona da microviga. Como tal, uniu-se cada um dos microcanais de PLA ao cacho também com cera. Esta construção encontra-se demonstrada na Figura 3.26.

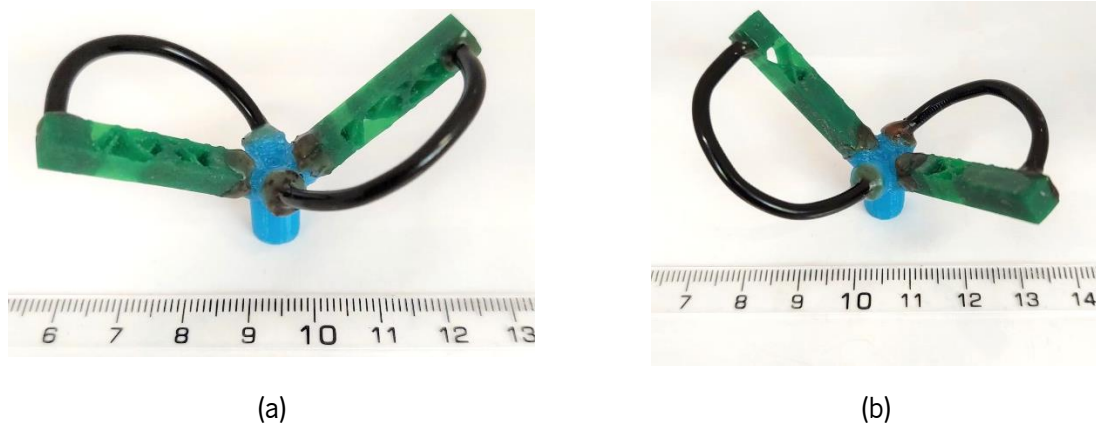


Figura 3.26 - Modelos de sacrifício com os microcanais de PLA: (a) microvigas otimizadas pelo método estático, (b) microvigas otimizadas pelo método modal.

Após este processo inseriu-se cada um dos modelos de sacrifício numa estrutura de encaixe, tal como evidenciado na Figura 3.27 à esquerda e, seguidamente, cada um destas estruturas foi inserida numa estrutura cilíndrica de aço, como se encontra mostrado na Figura 3.27 à direita.



Figura 3.27 - Preparação dos modelos de sacrifício antes da colocação do gesso.

Depois da preparação dos modelos procedeu-se à produção do gesso. As peças 3D foram infiltradas em gesso líquido para produzir então os moldes de cerâmica. Para a sua produção, uma vez que se trabalhou com moldes grandes as quantidades utilizadas de gesso líquido para cada molde foi de 450 g de gesso e 180 g de água.

Colocou-se então cada molde numa máquina, representada na Figura 3.28, para proceder à mistura, tendo-se retirado previamente o vácuo de forma a garantir que a máquina estaria a mexer somente água e gesso.



Figura 3.28 - Máquina utilizada para o procedimento da mistura de água e gesso.

Em seguida teve-se de esperar cerca de 20 min desde que foi inserido o gesso na última moldação até este estar solidificado em todas as moldações, tal como se observa na Figura 3.29.



Figura 3.29 - Moldações com o gesso solidificado.

Terminado este tempo de espera, colocaram-se então as moldações na mufla, representada na Figura 3.30 e, procedeu-se ao início do ciclo térmico do gesso.



Figura 3.30 - Mufla utilizada para a realização do ciclo térmico do gesso.

As moldações foram então submetidas ao ciclo térmico representado pela linha a vermelho no gráfico da Figura 3.31.

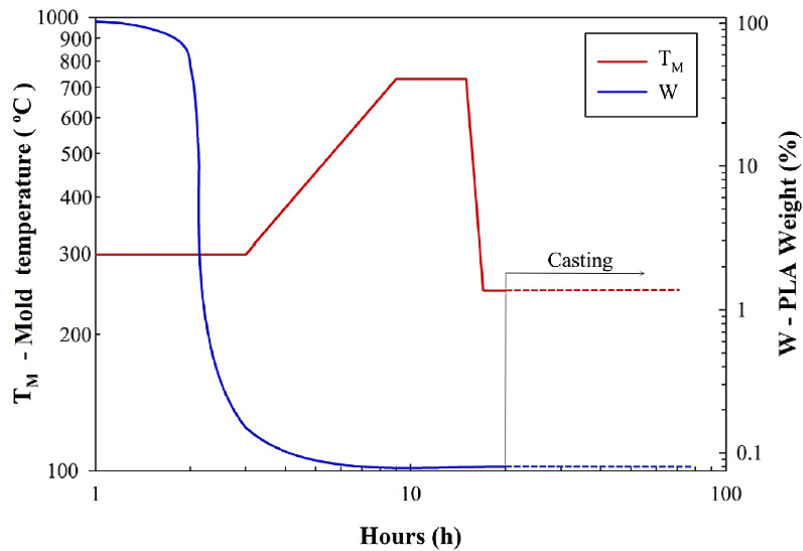


Figura 3.31 - Ciclo térmico durante o fabrico do molde em gesso [105].

Assim através deste ciclo, as microvigas em resina, a cera e os microcanais e cachos em PLA foram completamente eliminados durante este tratamento térmico. Este ciclo térmico permitiu que o gesso curasse completamente, assegurando uma alta precisão para a forma e dimensões do modelo para fundição.

O modelo impresso foi usado então como sacrifício para o fabrico de um molde em gesso, seguindo um ciclo de cura que elimina o modelo e endurece o molde (300°C–3h, 300°C até 730°C–5h, 730°C–6h e 730°C até 250°C–12h) [134]. Após este ciclo de cura, verificou-se que o modelo foi eliminado e os detalhes foram gravados em relevo como um negativo no molde em gesso.

### 3.2.3.2. FUNDIÇÃO DAS MICROVIGAS METÁLICAS:

Embora já tenha sido referido diversas vezes a intenção de utilizar a liga de alumínio A356, torna-se pertinente referir brevemente a sua utilidade para o presente processo de fundição. Sabe-se que as peças no seu estado fundido simples têm propriedades mecânicas muito baixas, daí precisarem do tratamento térmico. Assim, atendendo o propósito que se pretendia de realização de futuros ensaios mecânicos e a posterior necessidade de realização de um tratamento térmico, esta liga demonstrou ser adequada, dado ser tratável termicamente.

Além disso, a liga A356 é uma liga leve de fundição clássica, que pode ser processada em formas geométricas complexas com propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas personalizadas para aplicações específicas [160].



No que diz respeito então ao processo de fundição em si, a liga A356 já havia sido cortada perfazendo uma quantidade de 15 g, foi depois desengordurada e limpa com álcool isopropílico e seca com ar comprimido.

De notar que antes de colocar o cadinho de SiC (Carbeto de silício) no forno de fundição, este foi inserido no forno a 200°C somente para desidratar. Já o molde cerâmico havia sido mantido na mufla, ou seja, teve um pré-aquecimento (400°C) antes de colocado no forno de indução também.

Após isto, o cadinho foi colocado no forno de indução e, a liga A356 foi inserida no cadinho juntamente com Al5Ti1B (0,2%) e Al10Sr (0,3%) sendo estas ligas mãe para promover, respetivamente, a afinação do grão e a modificação do Si Eutético. O material máximo para as microvigas e cacho definido foi então 7,3 g, como foi calculado e referido anteriormente, garantindo assim uma quantidade ainda considerável para assegurar uma pressão metalostática durante o enchimento do metal líquido. Na Figura 3.32 à esquerda encontra-se representada a liga de A356 e as ligas mãe e, na Figura 3.32 à direita encontra-se apresentado as ligas inseridas no cadinho, a colocação do termopar para avaliação da temperatura do material fundido e o molde cerâmico já pré aquecido.



Figura 3.32 – Em (a) encontram-se representadas as 5 amostras, cada uma com 15 g da liga de A356 e ligas mãe (Al5Ti1B e Al10Sr) e, em (b) vista de cima do forno de indução: colocação do cadinho, molde cerâmico e liga A356 e ligas mãe, antes de iniciar processo de fundição.

Antes de iniciar a fundição da liga foi acionado o vácuo de forma a ajudar a preencher o molde. A liga A356 e as ligas mãe foram fundidos (750 °C) dentro de um forno de indução *Indutherm MC15+* representado na Figura 3.33.



Figura 3.33 - Forno de fundição *Indutherm MC15+*.

A fusão foi mantida isotérmica a  $750 \pm 2$  °C por 3 min para homogeneização, enquanto a agitação magnética de indução imposta impediu a sedimentação das partículas nucleantes. Durante este período de indução a pressão foi de  $P = -1$  bar. Na Figura 3.34 observa-se esse processo de fusão.

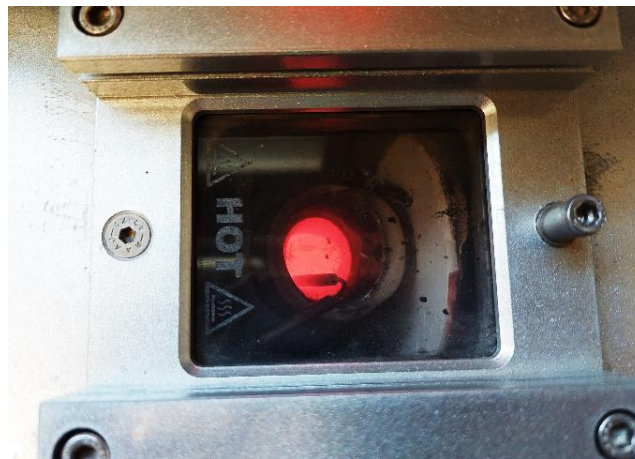


Figura 3.34 Fundição da liga A356 e das ligas mãe.

Após este período, começou-se a vazar o material fundido e a pressão ficou positiva  $P = 0,96$  bar por insuflação de Árgon, gerando pressão para encher no molde cerâmico. De referir que o tempo de vazamento tem de ser o suficiente até estar tudo solidificado na bacia de enchimento.

Após um período de solidificação e arrefecimento de 10 minutos, o molde cerâmico foi submerso em água para separar o gesso das amostras fundidas. Os resultados das amostras encontram-se representadas no Subcapítulo 4.3 referente aos Resultados da fabricação.

## 4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo encontram-se apresentados todos os resultados e análises numéricas efetuadas e, ainda, os resultados relativos à fabricação das microvigas reticuladas metálicas selecionadas.

### 4.1. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE ROTINAS NUMÉRICAS

Após a realização da otimização topológica nos dois modos, *Static Structural* e Modal, foram comparadas as formas resultantes dos dois métodos dado que as respostas obtidas foram diferentes. Desta forma, esta análise possibilitou a análise dos diferentes métodos de otimização, a abordagem estática ou modal. Para tal, construíram-se os gráficos referentes aos valores alcançados de rigidez estática e dinâmica para os casos das microvigas com 1 e 5 mm de espessura.

Assim, na primeira análise comparativa, representada na Figura 4.1, fez-se uma avaliação da rigidez estática para o caso da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão, com a otimização feita nos dois modos já referidos, *Static Structural* e Modal.

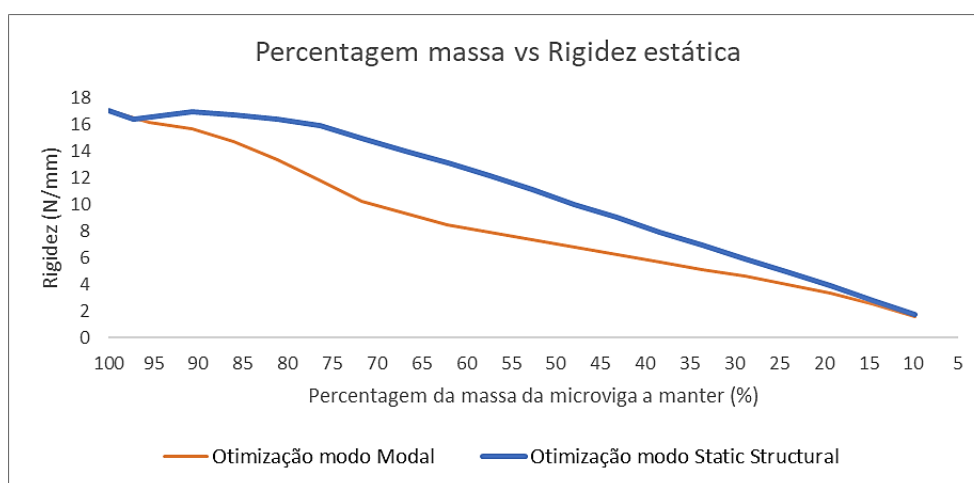


Figura 4.1 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

Através do gráfico acima representado observa-se então que, em termos de rigidez estática, as topologias efetuadas através do modo *Static Structural* apresentam melhores resultados e, é neste modo que se consegue o melhor valor de rigidez estática.

A justificação para os elevados valores de rigidez para o mesmo contexto de otimização topológica (isto é, percentagem da massa de microviga a manter) com a otimização no modo *Static Structural* pode ser explicada pela análise de dois casos distintos. Um dos casos reside nas microvigas com 76% da

massa original, onde a diferença de rigidez estática é considerável, tal como se observa na Figura 4.1. O outro cenário considerado é a situação das microvigas com 38% da massa original onde a diferença dos valores de rigidez estática já começa a ser mais atenuado.

No que concerne ao primeiro caso, constata-se que com a otimização feita no modo Modal ocorreu uma perda muito acentuada de massa na extremidade livre da microviga, tal como se verifica pela Figura 4.3. Isto ocorre uma vez ser considerado que a microviga apresenta a sua massa distribuída e, como tal, a remoção de material aquando da otimização inicia-se pela extremidade livre. Assim, sabendo que para a obtenção dos valores de rigidez estática é aplicada uma força externa para obter o valor do deslocamento nessa mesma extremidade, o que acontece é que esta ausência de material na extremidade livre potencia a perda rigidez. Já no que diz respeito à otimização no modo *Static Structural*, para a mesma área em análise, verifica-se que embora também aja perda de material na mesma zona que no modo Modal, esta não se concentra exclusivamente nessa zona, como se analisa pela Figura 4.2. Neste caso, há uma ligação interior de material com a extremidade livre o que favorece uma menor deformação da microviga e, conseqüentemente, melhores resultados ao nível da rigidez estática.

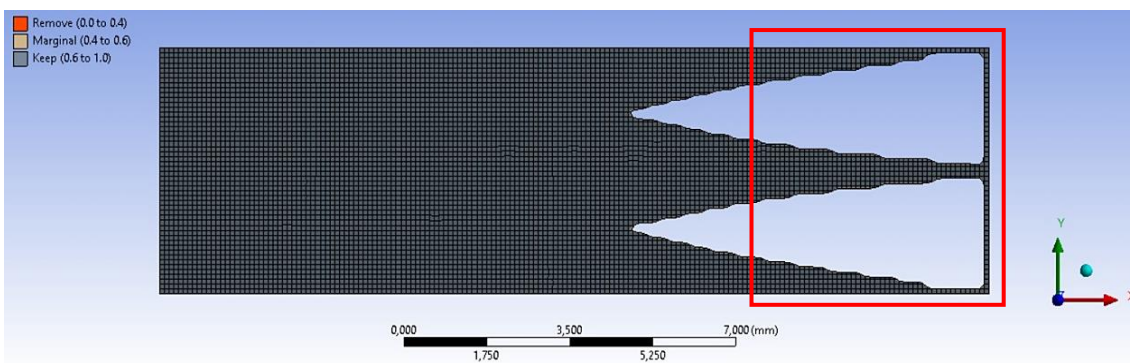


Figura 4.2 - Topologia da microviga de 1 mm com 76%, com otimização no modo *Static Structural*.

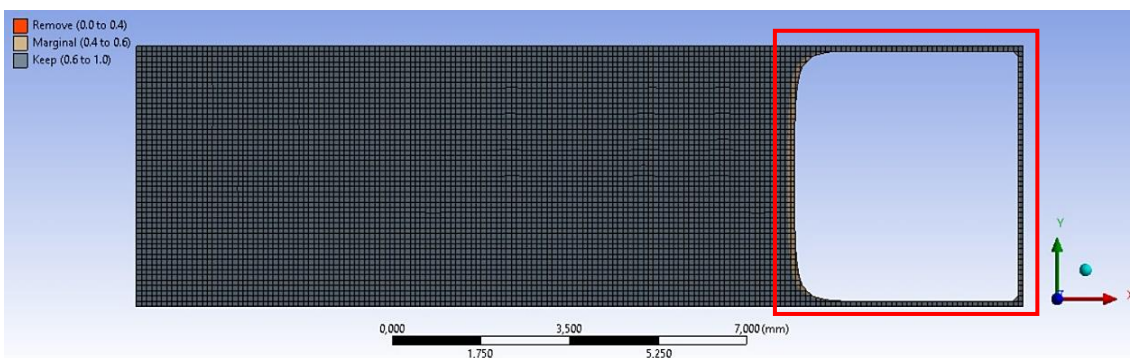


Figura 4.3 - Topologia da microviga de 1 mm com 76%, com otimização no modo Modal.

No que diz respeito à situação das microvigas com 38% da massa original, nas topologias de ambos os modos, ao contrário da situação anterior analisada, tanto uma como outra não dispõem de

uma ligação interior reticulada de material com a extremidade livre, tal como se verifica pela Figura 4.4 e Figura 4.5. No entanto, a otimização realizada no modo *Static Structural* continua ainda assim a ser mais benéfica dado que se conseguiu otimizar a microviga sem fragilizar tanto a perda de material nas arestas superior e inferior da microviga, como se encontra assinalado a vermelho na Figura 4.4. Pelo contrário, na Figura 4.5 verifica-se que há um comprimento considerável de aresta com uma espessura reduzida de material, ao contrário do que se observa na otimização no modo *Static Structural*. Sabendo então que esta região se situa junto da zona de aplicação da força, este acontecimento vai acentuar a redução da rigidez estática.

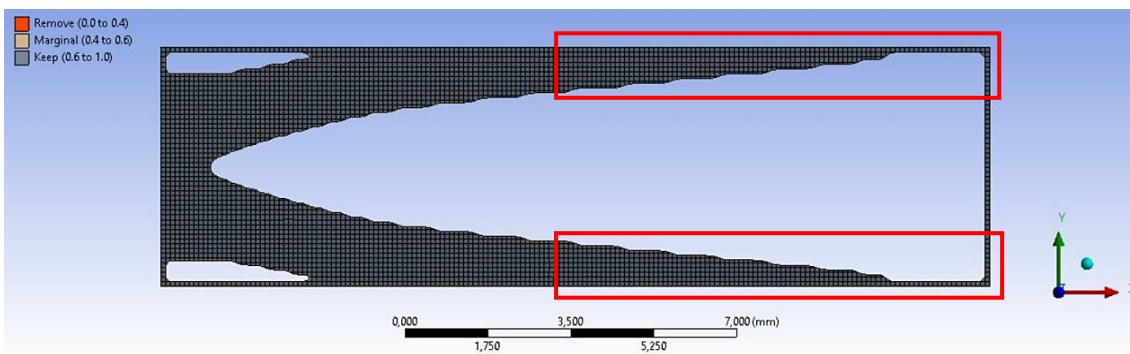


Figura 4.4 - Topologia da microviga de 1 mm com 38%, com otimização no modo *Static Structural*.

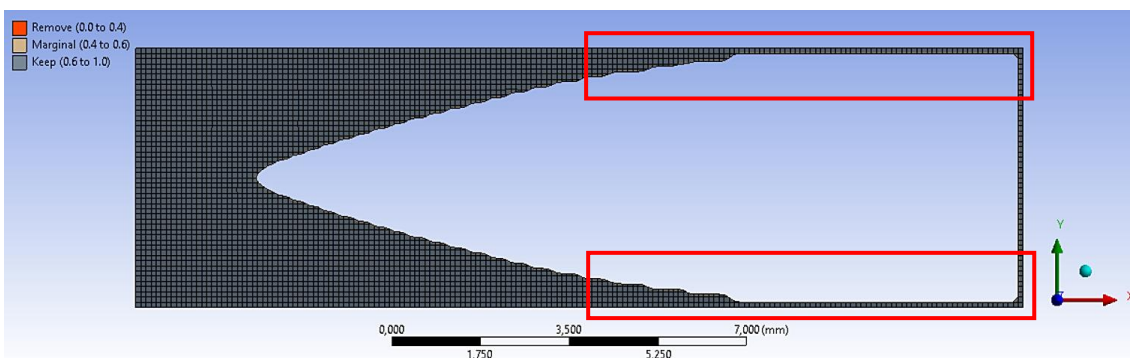


Figura 4.5 - Topologia da microviga de 1 mm com 38%, com otimização no modo Modal.

Sabe-se que as estruturas celulares apresentam uma alta resistência mecânica específica e uma baixa densidade, tal como já foi referido no estado de arte.

Como tal, mais interessante do que avaliar como varia a rigidez da microviga à medida que se vai reduzindo massa, é pertinente avaliar e definir a relação entre a rigidez e a massa. Isto porque à medida que se vai reduzindo a massa vai-se diminuindo a rigidez, mas isto pode não ser linear. Pode haver um ponto ótimo onde se consegue ter o compromisso entre rigidez e massa e, obter bons resultados de rigidez com a menor massa possível.

Assim, a construção deste gráfico, representado na Figura 4.6, permite sinalizar quais são efetivamente as formas mais promissoras dos resultados com as otimizações realizadas no modo *Static Structural* e no Modal.

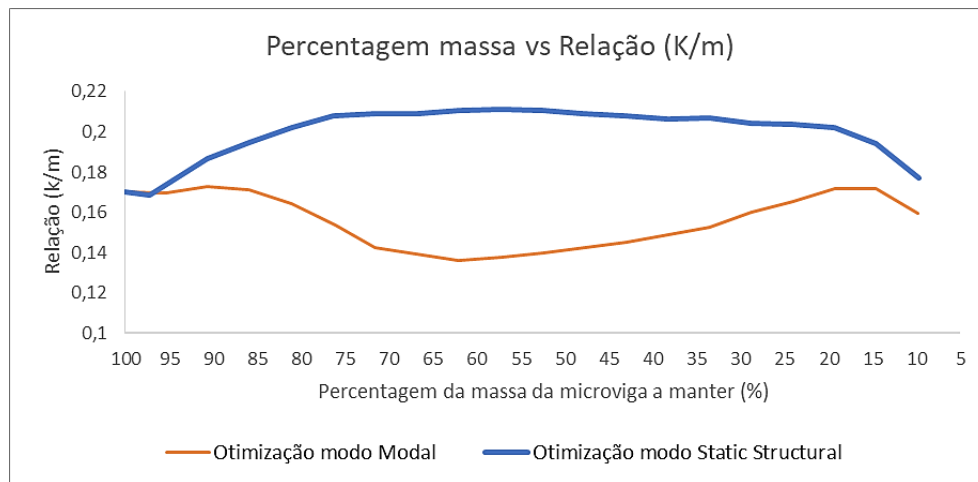


Figura 4.6 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

Através do gráfico da Figura 4.6 averigua-se assim que, para além de ser com a otimização do modo estático que se obtém um maior valor de rigidez estática é, ainda com ele que se consegue uma melhor relação de K/m em todas as formas obtidas.

Este resultado pode ser uma vez mais explicado pelo facto de as topologias obtidas no modo Modal apresentarem uma acentuada eliminação de material na região da extremidade livre, que influencia e vai promover fracos resultados, tanto ao nível da rigidez estática como da sua relação de K/m.

Uma segunda análise realizada foi avaliar uma vez mais a rigidez estática, mas para o caso da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, tal como representado na Figura 4.7.

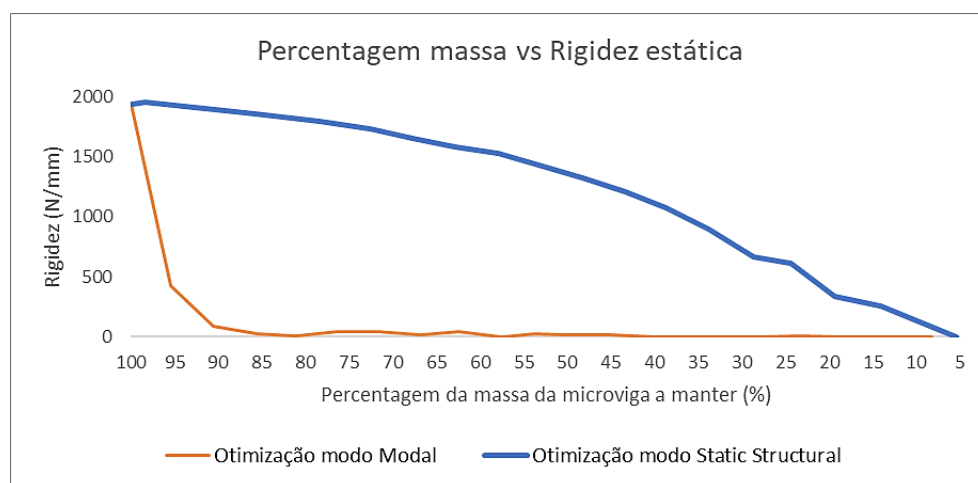


Figura 4.7 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

No que concerne a este estudo de rigidez estática, as topologias efetuadas no modo *Static Structural* revelaram-se indubitavelmente melhores. O que se verifica é que, analisando do ponto de vista estático, há um resultado muito fraco ao nível da otimização das microvigas efetuada no modo Modal.

Através da observação das topologias obtidas no modo *Static Structural* constatou-se que todas elas apresentam estruturas reticuladas bem definidas, já com alguma complexidade geométrica e uma distribuição não periódica. Na Figura 4.8 encontra-se então representada uma das topologias obtidas no modo *Static Structural* que, apresenta uma geometria eficiente, com apenas 48% da massa original e, que pode assim minimizar a utilização do material, otimizando ao mesmo tempo as propriedades mecânicas desejadas, rigidez, amortecimento e resistência.

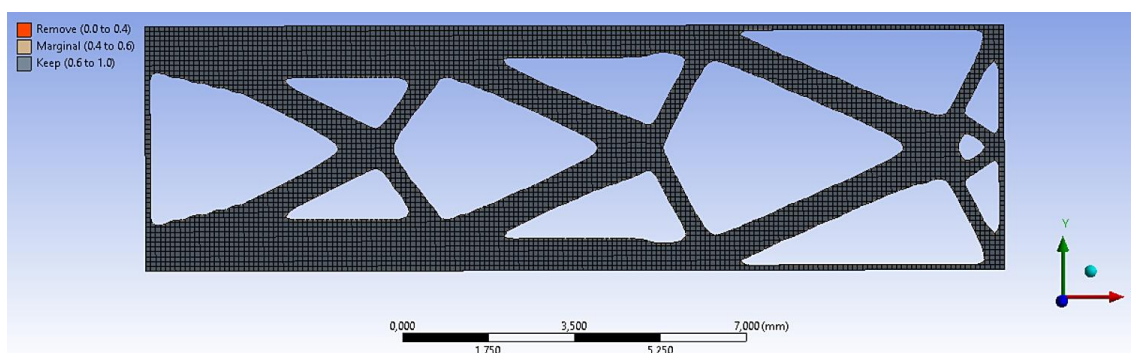


Figura 4.8 - Topologia da microviga de 5 mm com 48%, com otimização no modo *Static Structural*.

De forma mais concreta, a justificação e a análise do comportamento do gráfico da Figura 4.7 pode ser explicada pela análise de duas situações distintas.

Uma das situações reside na comparação das microvigas com 53% da massa original. Através da análise da Figura 4.10 verifica-se que com a otimização no modo Modal, uma vez mais, o processo de otimização destas microvigas começam por reduzir a sua massa na extremidade livre, tal como se repara na zona a vermelho sinalizada. Desta forma, ao ser colocada a força nessa zona para calcular a rigidez das vigas, estas deformam-se consideravelmente, apresentando assim resultados reduzidos ao nível da rigidez estática. Pelo contrário na otimização do modo *Static Structural*, existe uma boa ligação interior reticulada de material com a extremidade livre, como é observável na Figura 4.9.

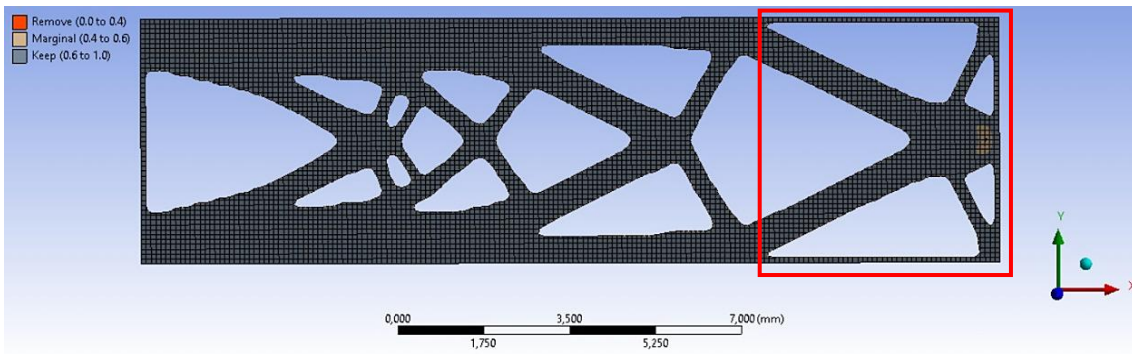


Figura 4.9 - Topologia da microviga de 5 mm com 53%, com otimização no modo *Static Structural*.

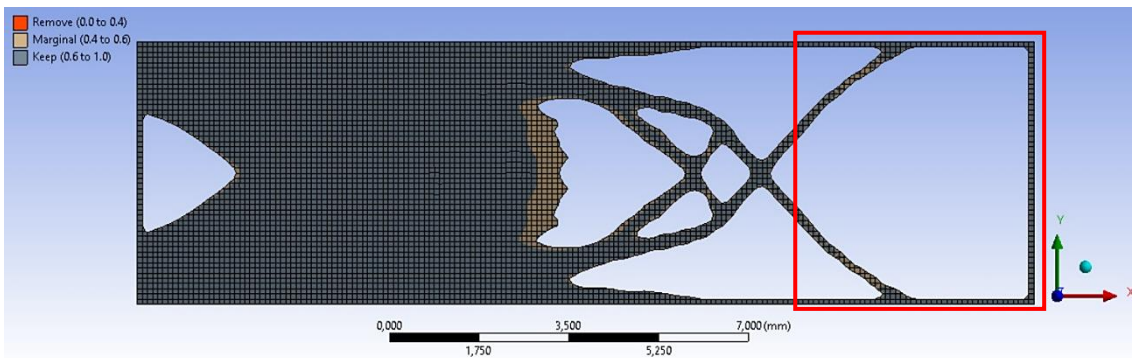


Figura 4.10 - Topologia da microviga de 5 mm com 53%, com otimização no modo Modal.

Avaliadas e já compreendidas as razões dos bons resultados de rigidez estática por parte das otimizações topológicas realizadas no modo *Static Structural*, falta ainda compreender os ínfimos aumentos de rigidez estática apresentados pelas topologias obtidas pelo modo Modal, visíveis na Figura 4.7. Para tal, pode servir de exemplo e análise uma dessas situações, que ocorre nos 66% e 62% da massa original da microviga, representadas na Figura 4.11 e Figura 4.12, respetivamente.

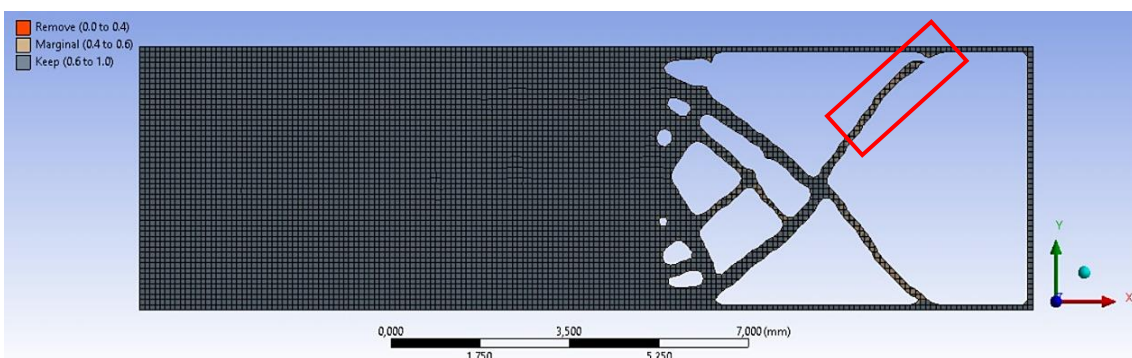


Figura 4.11 - Topologia da microviga de 5 mm com 66%, com otimização no modo Modal.



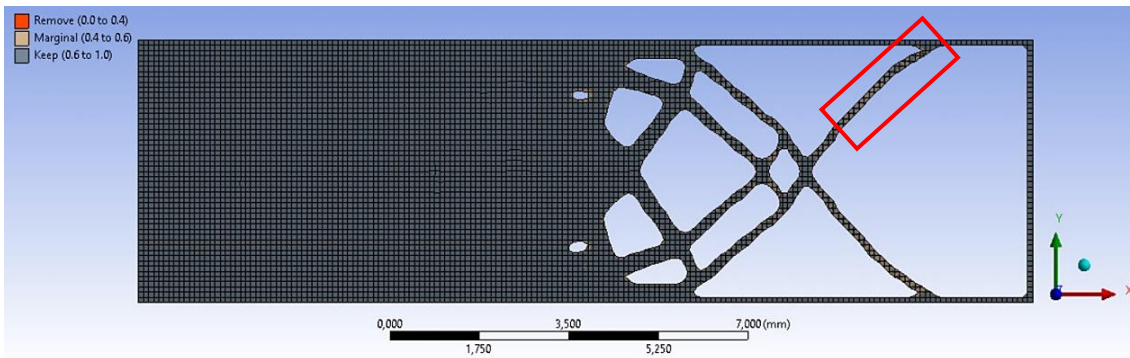


Figura 4.12 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal.

Aquilo que se verifica é que a otimização com 66% da massa original apresenta uma falha interior de ligação de material com a região periférica da microviga, como se encontra assinalado na Figura 4.11. Contrariamente, na Figura 4.12 esta falha já não existe daí a existência da irrisória melhoria do valor de rigidez estática, tal como se pode ver no gráfico da Figura 4.7.

Assim estas ínfimas melhorias e os seguintes decréscimos dizem respeito a situações semelhantes à anterior relatada.

Uma vez mais, avaliou-se a relação de rigidez sobre a massa da microviga, tal como se encontra apresentado na Figura 4.13, na medida em que, o mais interessante é obter bons resultados de rigidez, mas com a menor massa possível.

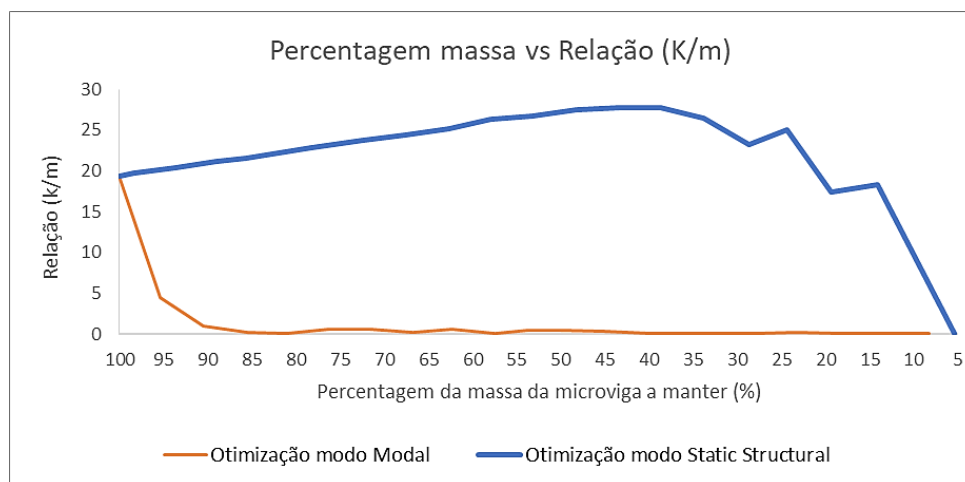


Figura 4.13 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

Constata-se desta forma que, para além de ser com a otimização do método estático que se obtém valores bastante superiores de rigidez estática é, também com ele que se consegue uma melhor relação de K/m em todas as formas obtidas nas sucessivas otimizações de redução de massa.

Este resultado pode ser explicado, uma vez mais, pelo facto de as topologias obtidas no modo Modal apresentarem uma grande retirada de material na região da extremidade livre, que influencia e vai propiciar fracos resultados, tanto ao nível da rigidez estática como da sua relação de K/m.

A topologia que apresenta o maior destaque dos resultados otimizados, com a melhor relação de K/m, encontra-se então representada na Figura 4.14.

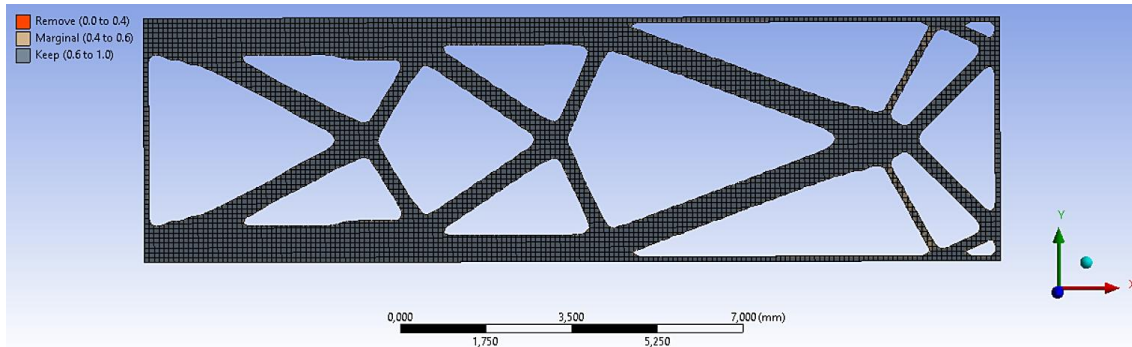


Figura 4.14 - Topologia da microviga de 5 mm com 38%, com otimização no modo *Static Structural*.

Analisando a topologia acima representada verifica-se que a estrutura exibida se traduz numa estrutura porosa com uma topologia simples capaz de respostas funcionais, aliado a um bom comportamento estrutural, que é aquilo expectável numa estrutura *lattice*. A estrutura demonstra ainda inteligentes direções geométricas de material, sendo leve em peso e com alta resistência.

Uma análise adicional, uma vez terem sido realizadas as otimizações no modo Modal com uma massa concentrada na extremidade livre da microviga com 5 mm de espessura, permitiu avaliar a rigidez estática entre as vigas otimizadas pelo método estático e modal. O objetivo deste estudo passou então por aferir se a colocação desta massa concentrada poderia propiciar melhores resultados ao nível da rigidez estática do que o estudo anterior. Na Figura 4.15 encontram-se assim representados os resultados obtidos.

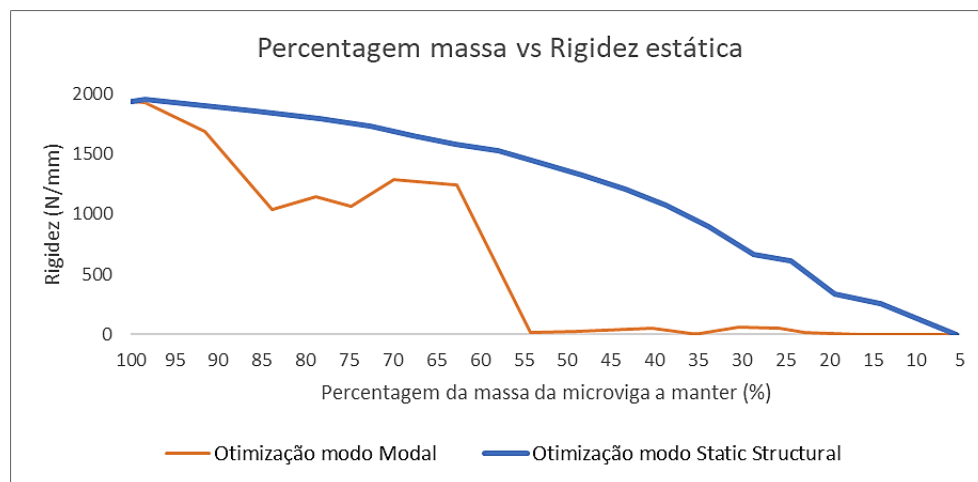


Figura 4.15 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal.

Uma vez que os resultados do modo *Static Structural* já foram analisados torna-se pertinente agora dar um maior ênfase aos resultados obtidos a partir do modo Modal. Através do gráfico acima apresentado observa-se então que os resultados com a otimização do método modal melhoraram substancialmente os seus valores de rigidez estática até à microviga com 62% da massa original. Na Figura 4.16 encontra-se a topologia do modo Modal referente à percentagem de massa de 62%.

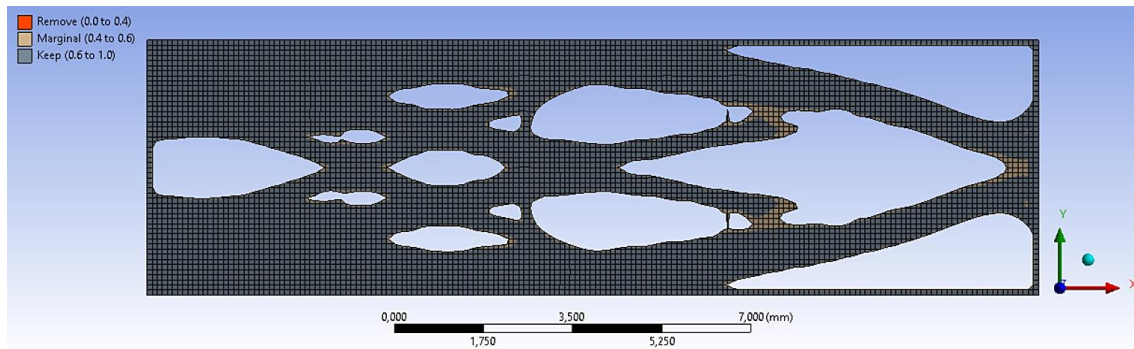


Figura 4.16 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada.

O que se verifica é que do ponto de vista geométrico é interessante a forma como ocorreu a distribuição do material, demonstrando ser uma estrutura mais notável nesse aspeto quando comparada com a topologia da microviga com a mesma percentagem, mas sem a existência de massa concentrada, tal como se constata pela Figura 4.12.

No entanto, a partir da percentagem de 62% sucederam-se novamente valores reduzidos. Isto acontece dado que se verificam falhas de material ou de ligação do mesmo com a extremidade livre da viga, na região da aplicação da força exterior. Um exemplo disso é a topologia de microviga com 54% da massa original, representada na Figura 4.17.

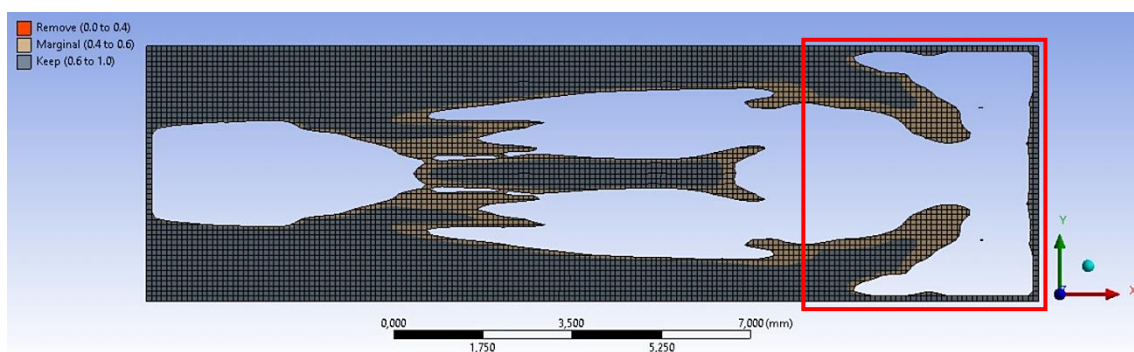


Figura 4.17 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada.

Tal como se pode ver pela topologia acima evidenciada, há falhas de ligação interior de material com a região fronteira, fragilizando a zona da aplicação da carga o que vai traduzir em maiores valores de deformação.

De ressaltar ainda que, aos 40%, 30% e 25% observam-se no gráfico da Figura 4.15 pequenas subidas, dado que nestas geometrias otimizadas as microvigas apresentam alguma ligação de material com a extremidade de aplicação da força ou ligação de material próximo desta.

No que diz respeito ao caso de 40%, verifica-se que existe ligação interior de material com a área da extremidade livre, daí o ínfimo aumento de rigidez estática. No entanto, há falhas na região precedente à fronteira, assinaladas na Figura 4.18, que influencia também o reduzido resultado quando comparado com os resultados da otimização pelo método estático. Para além disso esta topologia não apresenta uma estrutura reticulada com uma geometria muito eficiente do ponto de vista do comportamento estrutural.

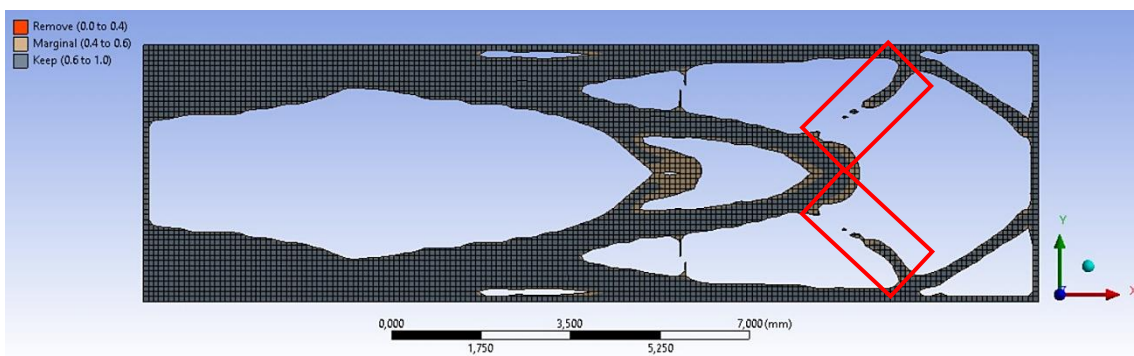


Figura 4.18 - Topologia da microviga de 5 mm com 40%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada.

Relativamente ao caso da microviga com 30%, verifica-se que esta apresenta pouca densidade de material no interior da microviga, não permitindo um bom arranjo estrutural e geométrico do material, tal como se encontra assinalado na Figura 4.19. Como tal, é lhe conferido um resultado fraco ao nível de rigidez estática. De notar, no entanto, que a ínfima melhoria é obtida pela ligação reticulada de material com a região de aplicação de carga, tal como se encontra assinalado a verde.

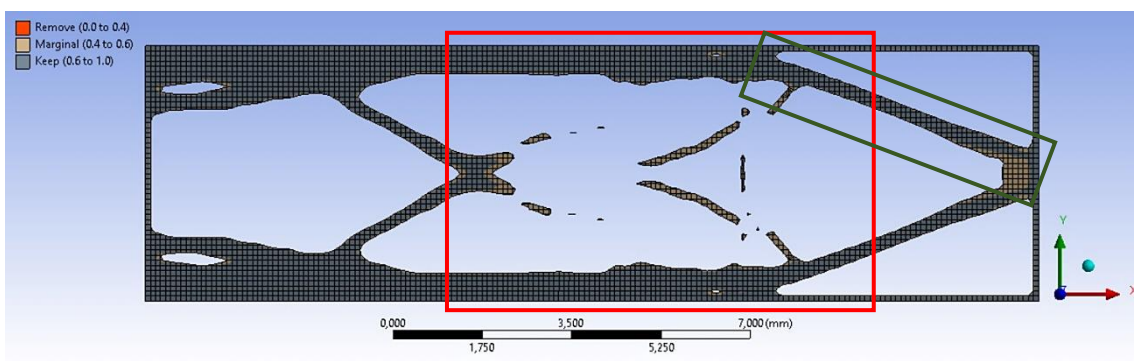


Figura 4.19 - Topologia da microviga de 5 mm com 30%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada.

De forma a perceber que de facto a topologia acima representada não apresenta uma boa distribuição de material, encontra-se em baixo demonstrada na Figura 4.20 a microviga com a mesma percentagem de material, mas otimizada no modo *Static Structural*.

Aquilo que se observa é que de facto esta otimização topológica efetuada no modo *Static Structural* apresenta melhores orientações geométricas que proporcionam maior rigidez e uma melhor relação resistência/peso.

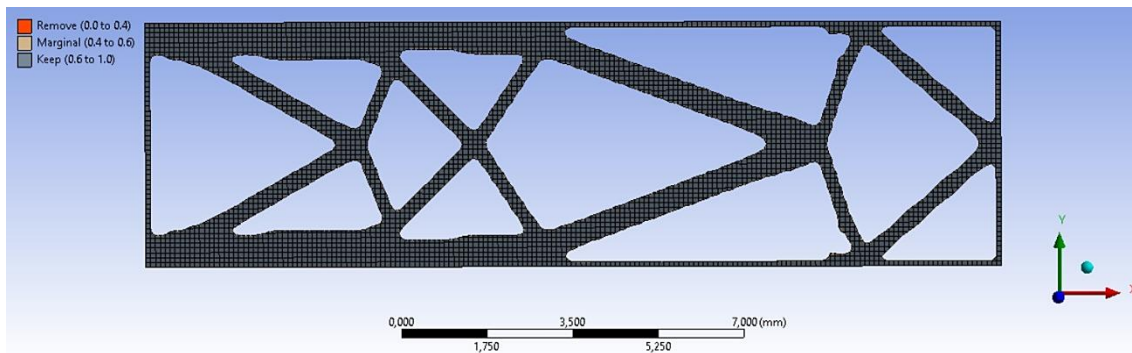


Figura 4.20 - Topologia da microviga de 5 mm com 30%, com otimização no modo *Static Structural*.

Quanto ao caso de microviga com 25%, verifica-se que esta não apresenta, tal como no caso da estrutura dos 30%, um bom arranjo estrutural e geométrico do material no interior tal como se encontra assinalado na Figura 4.21. Daí, esta topologia apresentar igualmente um resultado fraco ao nível de rigidez estática. De notar, no entanto, que há de facto uma ínfima melhoria sendo esta devida à coesão minimamente satisfatória de ligação de material próximo da zona do emprego da carga.

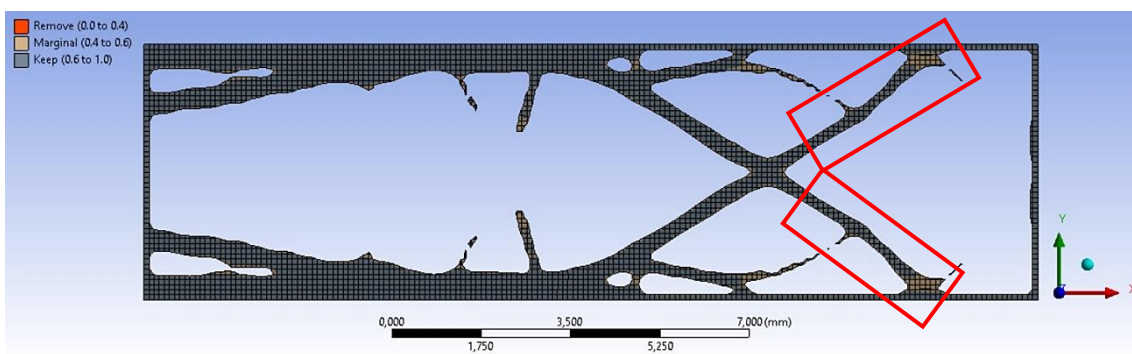


Figura 4.21 - Topologia da microviga de 5 mm com 25%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada.

De notar que, apesar do incremento ocorrido em alguns dos resultados, em todas as análises de redução de massa as topologias efetuadas através do modo *Static Structural* apresentam novamente melhores resultados.

Assim, torna-se necessário avaliar a relação de rigidez sobre a massa numa nova iteração, estando os resultados apresentados na Figura 4.22.

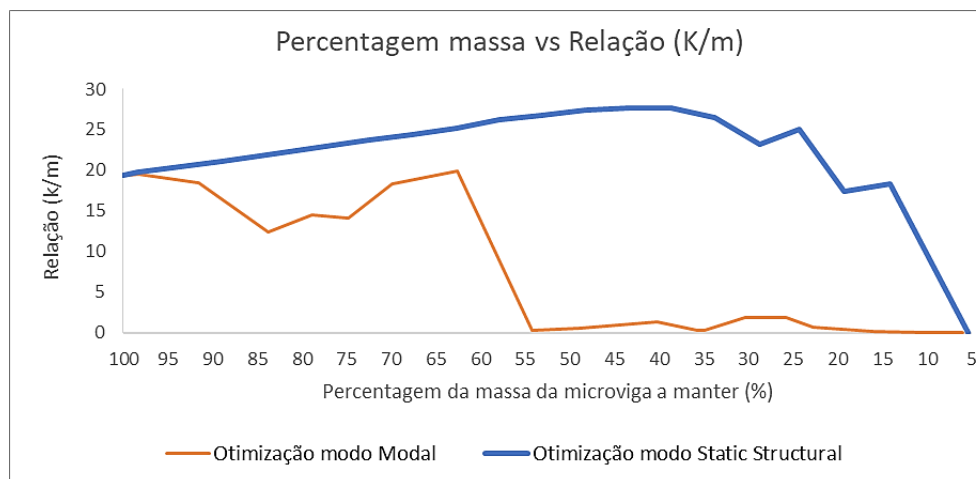


Figura 4.22 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal.

Verifica-se tal como no estudo anterior que, para além de ser com a otimização do método estático que se obtém valores superiores de rigidez estática é, também com ele que se consegue uma melhor relação de K/m em todas as formas reticuladas alcançadas nas sucessivas otimizações de redução de massa. No entanto, é importante realçar o bom resultado obtido na microviga com cerca de 62% da massa original onde se recorreu ao método modal.

As duas estruturas destacáveis na Figura 4.22, pelo método estático e modal, encontram-se representadas na Figura 4.14 e Figura 4.16, respetivamente, e evidenciam-se assim pelo bom rácio K/m. Estas conseguem manter a integridade estrutural mesmo com a ocorrência da redução de massa, sendo este o benefício mais importante e a principal razão que leva ao interesse pela utilização de estruturas *lattice*.

As microvigas de 38% e 62%, otimizadas no modo *Static Structural* e Modal, respetivamente, apresentam assim uma distribuição do material da forma estrutural mais eficaz possível, permitindo os seus bons resultados, com a capacidade de terem uma massa relativa baixa, garantindo ao mesmo tempo uma elevada resistência e rigidez. No entanto, claramente há que ressaltar e dar um grande destaque à microviga de apenas 38% otimizada no modo *Static Structural* que, com muita menor massa apresenta um excelente compromisso na relação de K/m.

Após terem sido avaliados os resultados de rigidez estática averiguou-se também os resultados ao nível de rigidez dinâmica de maneira a poder fazer também algumas comparações e retirar conclusões.

Numa primeira análise fez-se então uma avaliação da rigidez dinâmica para o caso da microviga de 1 mm de espessura, com a otimização feita nos modos Modal e *Static Structural*, encontrando-se os resultados apresentados na Figura 4.23.

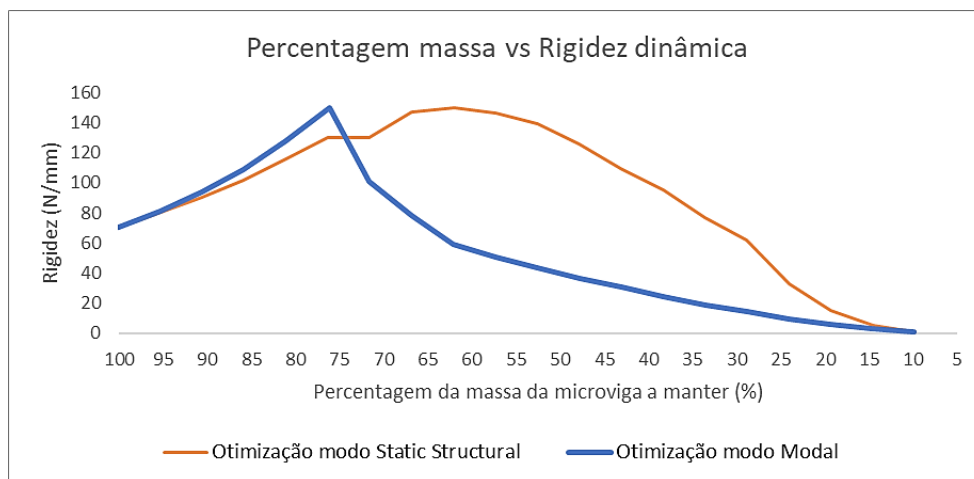


Figura 4.23 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 1 mm de espessura.

Em termos de rigidez dinâmica, a topologia efetuada no modal consegue ser melhor nas microvigas otimizadas até aproximadamente os 75% da massa original e, obtém o valor máximo de rigidez dinâmica nesse mesmo ponto. A rondar os 70%, as otimizações feitas no modo *Static Structural* começam a destacar-se permanentemente com valores superiores de rigidez dinâmica aos obtidos no modo Modal.

Esta alteração ocorre devido ao facto de no modo Modal haver uma maior perda de massa nas vigas junto das áreas fronteira da extremidade livre inclusive nas arestas delimitadoras, quando comparado com as formas obtidas no modo *Static Structural*. Isto vai traduzir-se numa redução do valor da frequência natural do primeiro modo de vibração e, conseqüentemente, na redução da rigidez das microvigas.

De forma a ilustrar e a visualizar então esta inversão de comportamento e o que foi acima dito, onde os resultados das topologias obtidas pelo método estático se começam a destacar, encontra-se representado na Figura 4.24 e Figura 4.25 as topologias otimizadas por ambos os modos com 66% da massa original. Nesta percentagem de material já há um grande destaque da otimização do modo *Static Structural* e observa-se uma diferença de rigidez dinâmica considerável, tal como se observa na Figura 4.23.

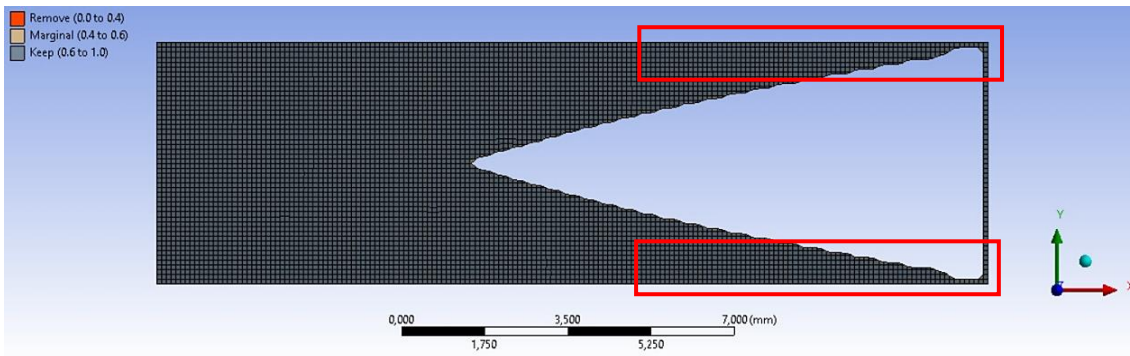


Figura 4.24 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo *Static Structural*.

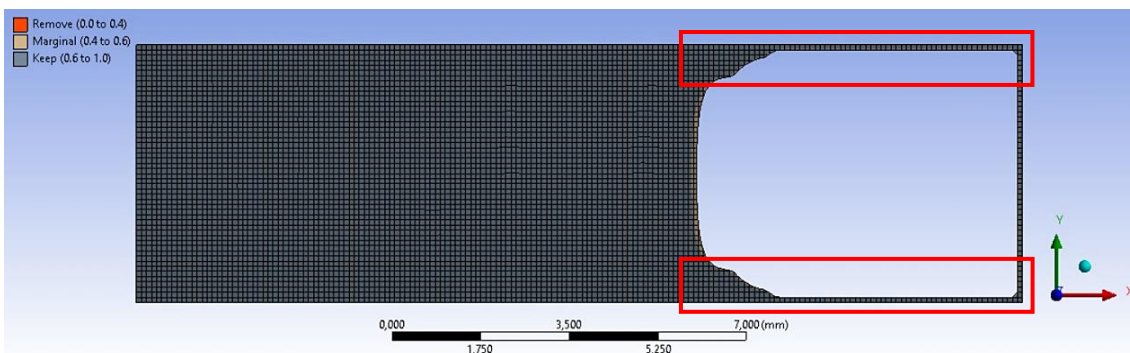


Figura 4.25 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo Modal.

Através da exposição das duas topologias, constata-se que na otimização feita no modo Modal ocorreu uma perda muito acentuada de massa numa zona concentrada junto da extremidade livre da microviga. Já no que diz respeito à otimização no modo *Static Structural* para a mesma área em análise, verifica-se que embora também aja perda de material na mesma zona que no modo Modal, esta não se concentra exclusivamente nessa zona, como se analisa pela Figura 4.24. Assim, o caso da otimização realizada no modo *Static Structural* acaba por ser mais benéfico dado que se conseguiu otimizar a microviga sem fragilizar tanto a perda de material nas arestas superior e inferior da microviga, como se encontra assinalado a vermelho na Figura 4.24. Pelo contrário, na Figura 4.25 há um comprimento considerável das arestas fronteiriças limitadas às restrições impostas de otimização, ou seja, com uma espessura reduzida de material, ao contrário do que se observa na otimização no modo *Static Structural*.

Desta forma, tal como já foi anteriormente referido, o facto de na otimização realizada no modo Modal haver uma maior perda de massa junto das áreas fronteiriças da extremidade livre, inclusive nas arestas delimitadoras da microviga, vai propiciar uma maior vulnerabilidade a deformar o que se vai traduzir numa redução do valor da frequência natural do primeiro modo de vibração e, conseqüentemente, na redução da rigidez dinâmica.



Esta análise e explicação da fragilização de material pode inclusive ser clarificada fazendo uma verificação da análise modal da microviga visualizando os modos de vibração.

Aquilo que se observa com a topologia do método modal é que logo no primeiro modo de vibração ocorre a flexão apenas na zona da região de ausência de material, tal como se observa na Figura 4.26, com uma frequência natural de 3535 Hz. Verifica-se assim que efetivamente esta é a região com maior vulnerabilidade.

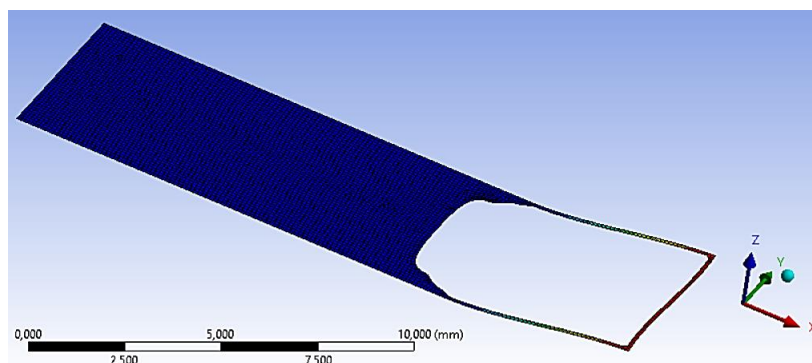


Figura 4.26 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo Modal - 1º modo de vibração.

Em comparação, quanto à topologia otimizada pelo método estático verifica-se que no primeiro modo de vibração toda a microviga encontra-se à flexão, tal como está representada na Figura 4.27, sendo a sua frequência natural de 4863 Hz, valor este mais alto que o do primeiro modo da topologia obtida pelo método modal. De notar ainda que, nesta topologia otimizada pelo método estático, somente no terceiro modo de vibração é que ocorre a deformação da microviga associada diretamente à zona enfraquecida de material, facto esse observado na Figura 4.28.

Os factos acima referidos evidenciam que efetivamente no método modal a maior perda de massa junto das áreas fronteira da extremidade livre, inclusive nas arestas delimitadoras da microviga, propiciam uma maior vulnerabilidade na deformação da estrutura, fomentando assim os valores inferiores de rigidez dinâmica das topologias obtidas pelo modo Modal a partir dos 70% da massa original.

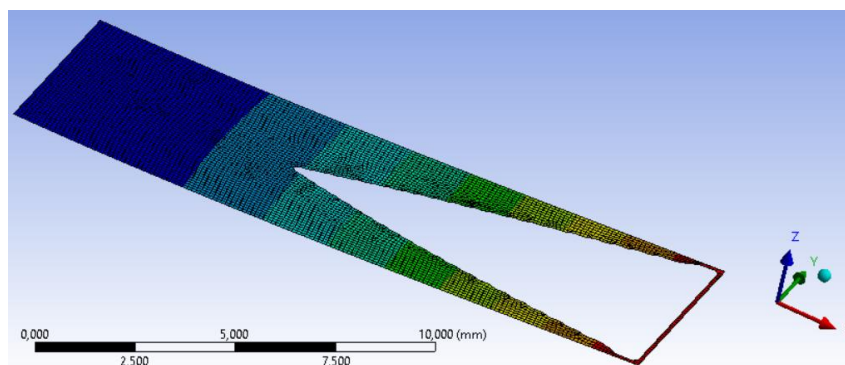


Figura 4.27 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo *Static Structural* - 1º modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente).

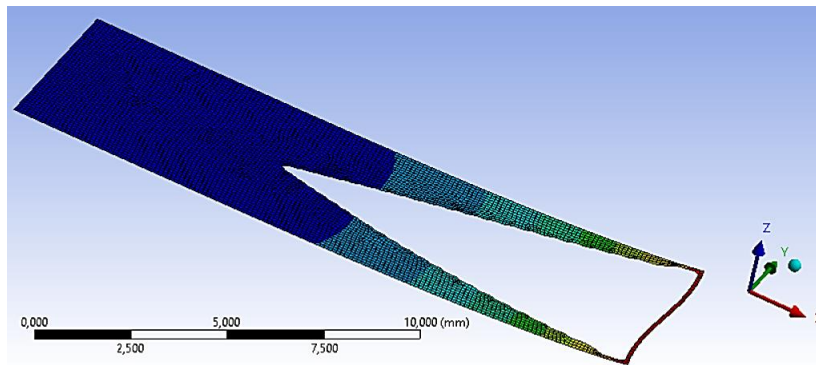


Figura 4.28 - Topologia da microviga de 1 mm com 66%, com otimização no modo *Static Structural* - 3º modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente).

Além de avaliar os resultados de rigidez dinâmica, torna-se de novo pertinente avaliar a relação de rigidez sobre a massa, dada a relevância de perceber o comportamento desta relação de obter bons resultados de rigidez com a menor massa possível, estando os resultados expressos na Figura 4.29.

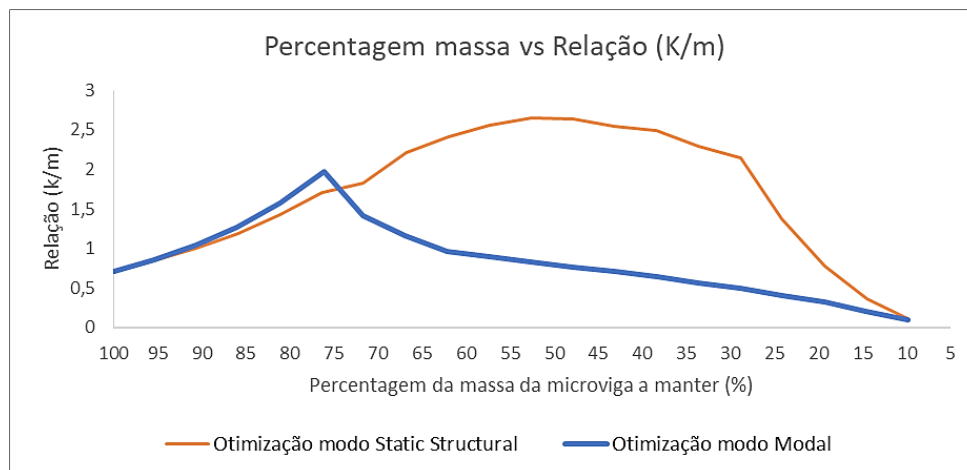


Figura 4.29 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura.

Constata-se assim que, embora seja com a otimização modal que se consegue um melhor valor de rigidez dinâmica é com a otimização no modo estático que se obtém uma melhor relação de K/m, em grande parte das microvigas otimizadas alcançadas.

De forma adicional e de maneira a perceber a diferença, encontram-se representadas na Figura 4.30 e Figura 4.31 a topologia que apresenta o maior destaque da relação de K/m pelo método estático com uma percentagem de 52% e a topologia obtida pelo método modal com a mesma percentagem, respetivamente.

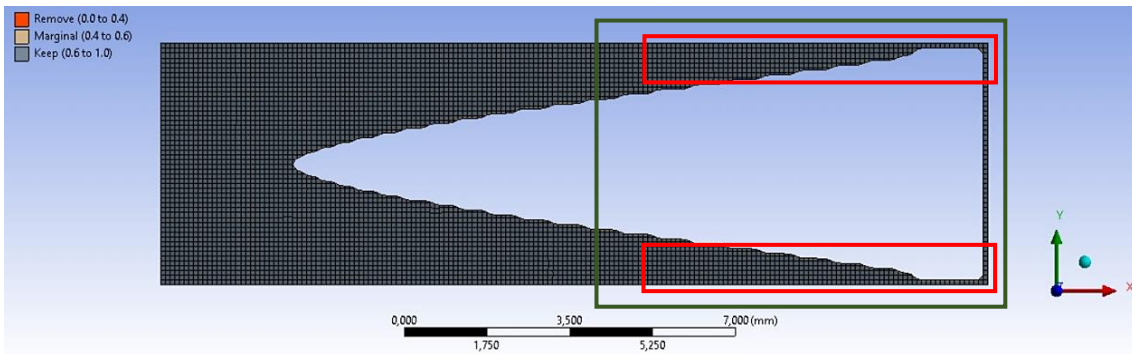


Figura 4.30 - Topologia da microviga de 1 mm com 52%, com otimização no modo *Static Structural*.

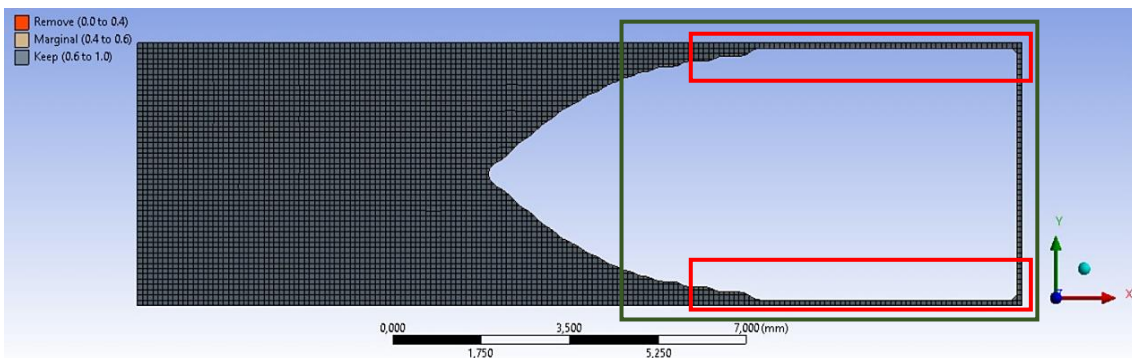


Figura 4.31 - Topologia da microviga de 1 mm com 52%, com otimização no modo Modal.

Uma vez mais, o problema e a justificação para os resultados inferiores de rigidez dinâmica otimizados no modo modal mantêm-se. A existência de uma área mais concentrada de perda de massa, assinalada a verde e a reduzida espessura das arestas da microviga nessa mesma zona, assinalado a vermelho, promovem fracos resultados o que vem corroborar com o que já foi apurado e verificado.

Numa segunda análise fez-se igualmente uma avaliação da rigidez dinâmica, mas para o caso da microviga de 5 mm de espessura, com a otimização feita nos modos Modal e *Static Structural*. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 4.32.

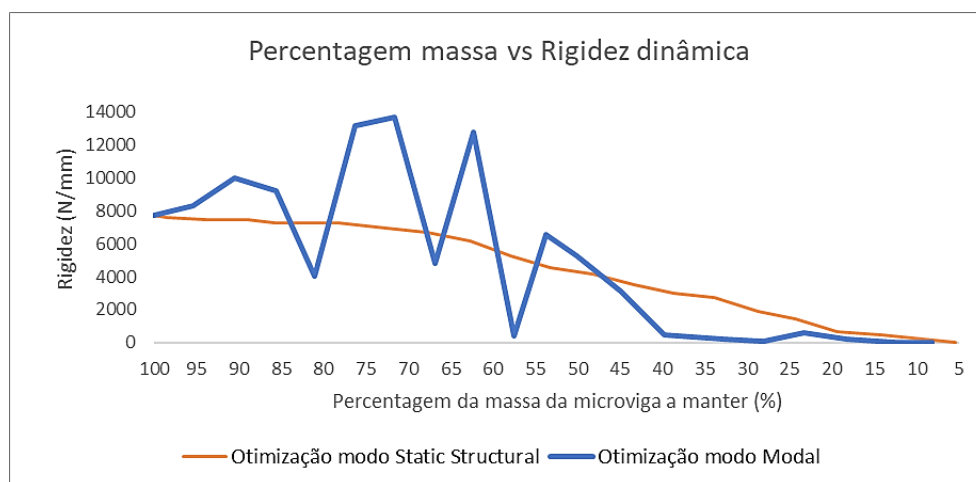


Figura 4.32 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura.

O gráfico apresentado acima permite observar que em termos de rigidez dinâmica, a topologia efetuada no modal consegue ser melhor em perto de metade das formas obtidas e, é nesta topologia em que se obtém o valor máximo de rigidez dinâmica.

De notar que, possivelmente sem as falhas de ligação de material das estruturas reticuladas nos 81%, 66% e 57% da massa original, apresentadas na Figura 4.33, Figura 4.11 e Figura 4.34, respetivamente, os valores de rigidez dinâmica obtidos pela otimização feita no modo Modal seriam maiores e, quiçá superiores aos das formas obtidas pelo modo *Static Structural*, o que eliminaria esses três primeiros picos negativos observados no gráfico.

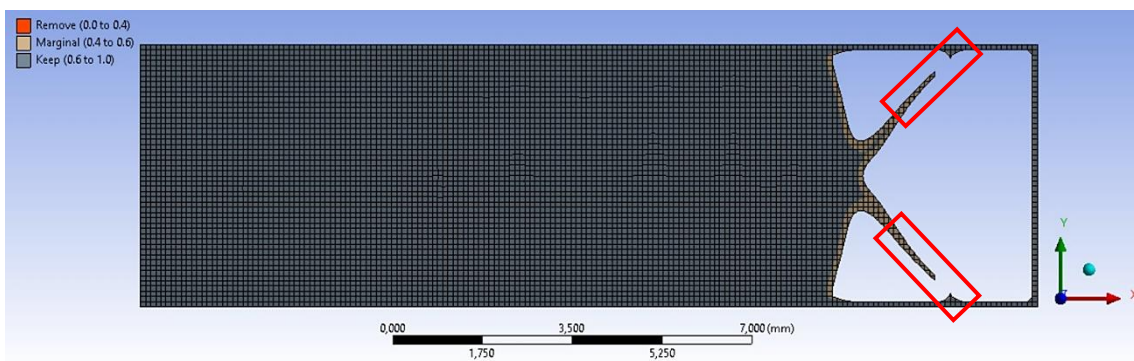


Figura 4.33 - Topologia da microviga de 5 mm com 81%, com otimização no modo Modal.

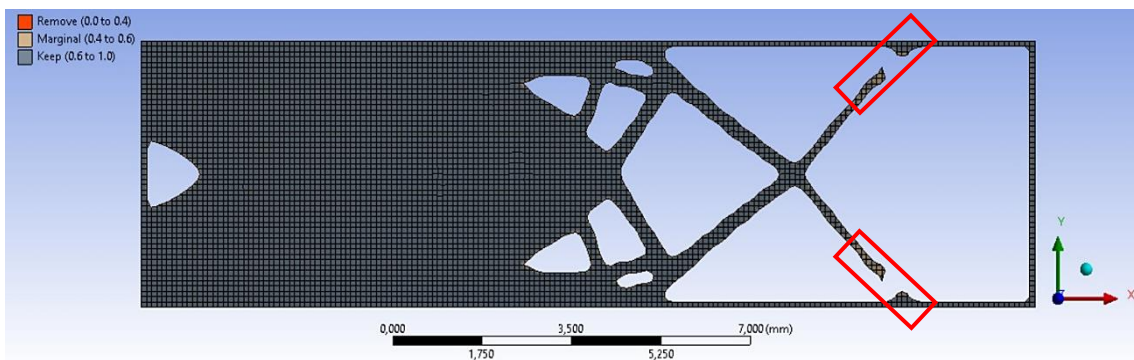


Figura 4.34 - Topologia da microviga de 5 mm com 57%, com otimização no modo Modal.

A rondar os 45% é possível verificar que ocorre uma mudança. Ou seja, as geometrias das vigas otimizadas obtidas no modo *Static Structural* apresentam valores superiores de rigidez dinâmica devido, provavelmente, ao facto de as estruturas reticuladas obtidas no modo *Static Structural* apresentarem uma melhor distribuição e arranjo do material do que no modo Modal, ou seja, sem uma perda excessiva de material na extremidade livre das microvigas que potenciam a diminuição da frequência do primeiro modo de vibração.

De forma a confirmar e validar o que foi acima fundamentado, encontram-se seguidamente as topologias das microvigas com 44% da massa original conseguidas através do método estático e modal, e que se encontram apresentadas na Figura 4.35 e Figura 4.36, respetivamente, corroborando com o que foi acima descrito.

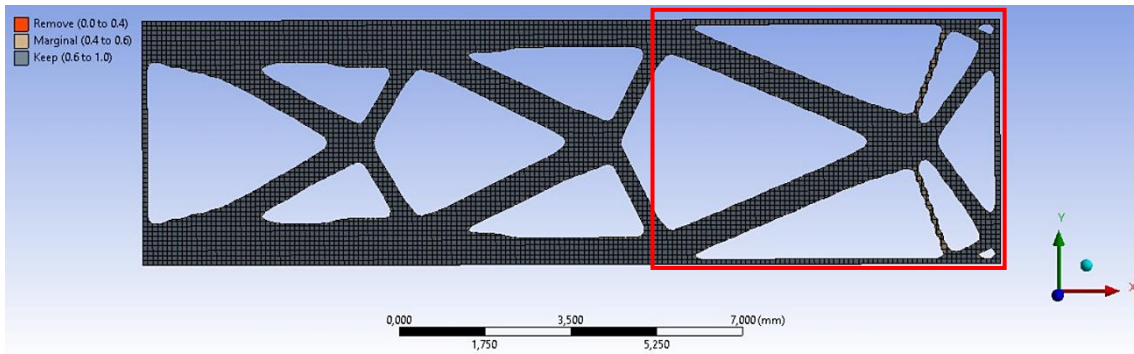


Figura 4.35 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo *Static Structural*.

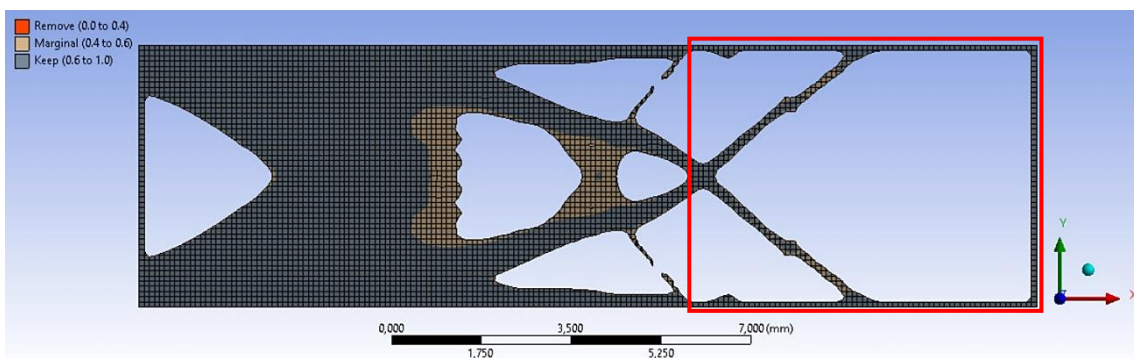


Figura 4.36 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal.

Uma vez mais, a avaliação e explicação acerca da fragilização de material, acima referida, sentida particularmente na otimização realizada no modo Modal pode ser comprovada investigando os resultados da análise modal da microviga visualizando os seus modos de vibração.

O que se constata é que na topologia da microviga efetuada pelo método modal logo no primeiro modo de vibração ocorre flexão, mas apenas circunscrita à região de ausência de material, tal como é visível na Figura 4.37, com uma frequência natural de 12171 Hz.

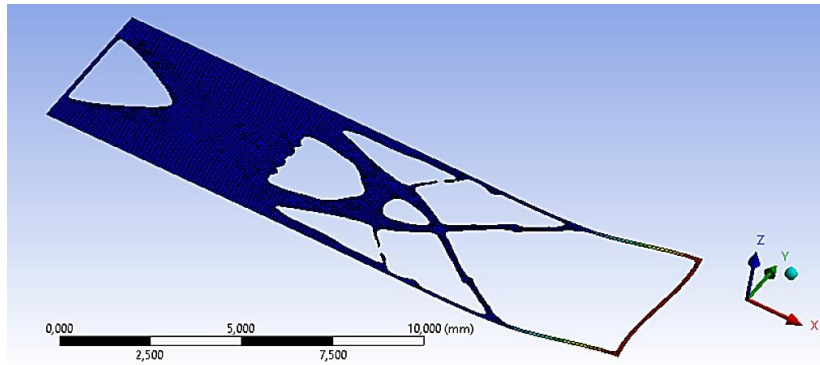


Figura 4.37 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal - 1º modo de vibração.

De ressaltar que, somente no segundo modo de vibração é que ocorre o comportamento de flexão associado a toda a microviga, como se encontra apresentado na Figura 4.38, com uma frequência natural de 22843 Hz. Demonstra-se assim que, a perda excessiva de massa junto da área fronteira da extremidade livre, propicia uma maior vulnerabilidade da microviga.

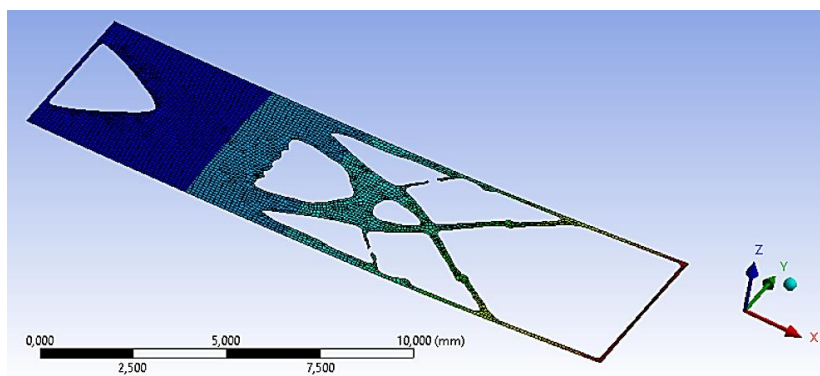


Figura 4.38 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo Modal - 2º modo de vibração.

Comparando com a topologia otimizada pelo método estático verifica-se que no primeiro modo de vibração toda a microviga se encontra à flexão, e não em nenhuma área em particular, tal como está evidenciado na Figura 4.39, sendo a sua frequência natural de 13243 Hz.

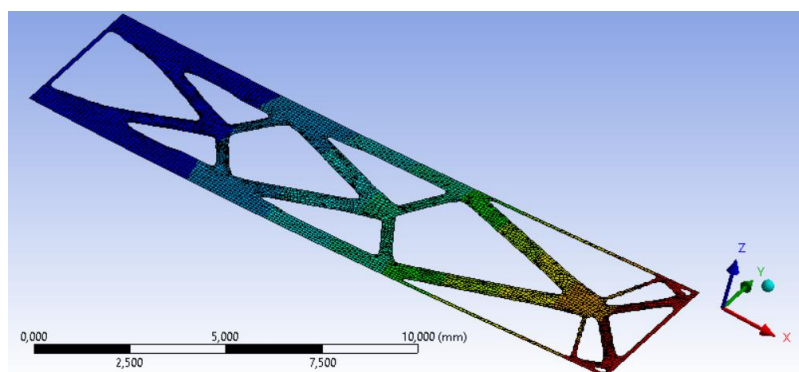


Figura 4.39 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo *Static Structural* - 1º modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente).

Comparando desta forma, o valor da frequência natural do primeiro modo de vibração de ambas as microvigas, com otimização no modo *Static Structural* e Modal, este valor é mais baixo na topologia obtida pelo método modal, o que demonstra e comprova que esta apresenta uma maior deflexão da estrutura em consequência da ausência de material concentrada na extremidade livre da microviga.

Para além de avaliar os resultados de rigidez dinâmica, torna-se novamente relevante analisar a relação de rigidez sobre a massa, devido à importância de perceber o comportamento desta relação. O gráfico da Figura 4.40 mostra assim os resultados obtidos.

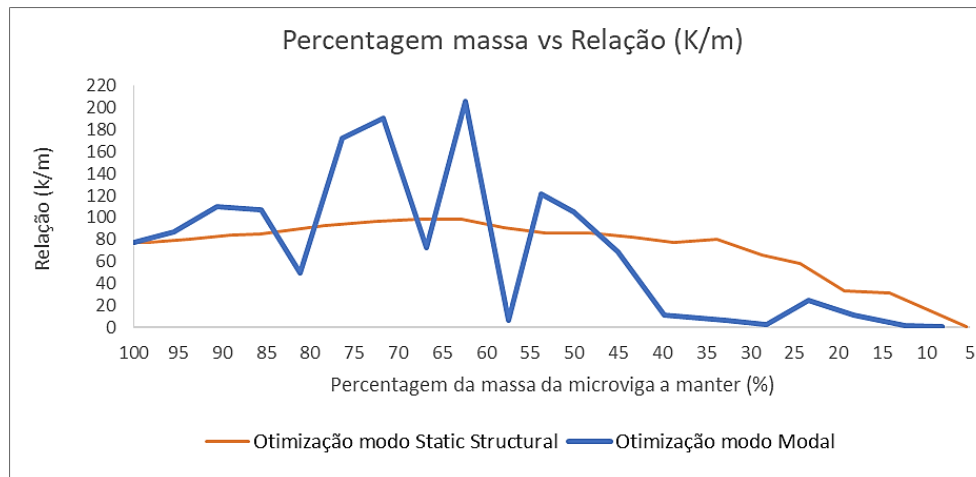


Figura 4.40 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura.

Constata-se assim que, é com a otimização modal que se consegue um melhor valor de rigidez dinâmica e, é com esta que se obtém um valor mais elevado da relação de K/m, embora com a otimização no modo estático se encontrem valores desta relação superiores aos obtidos no modo Modal pelas razões já acima ditas.

Em suma, através das diversas conclusões e análises desenvolvidas acima, é possível tecer duas reflexões no que concerne às análises estáticas e dinâmicas de microvigas, sob condições fronteira e de carregamento iguais às aplicadas no presente trabalho.

A primeira reflexão está relacionada com a rigidez estática. Ou seja, quando for necessário realizar um estudo estático e analisar microvigas, ao nível da rigidez estática basta realizar a otimização topológica no modo *Static Structural*. A justificação para tal, reside no facto de ser neste modo em que se obtiveram melhores valores de rigidez estática e melhores relações de K/m. Ou seja, as formas das microvigas otimizadas nesse modo são as mais promissoras para um estudo estático.

Por outro lado, quando for pertinente estudar e analisar a rigidez dinâmica destas microvigas, talvez seja relevante realizar os dois estudos, ou seja, os estudos de otimização pelos métodos estático

e modal, uma vez que ambos apresentaram resultados interessantes ao nível de rigidez dinâmica e das relações de  $K/m$ .

#### 4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE ROTINAS NUMÉRICAS COM RESTRIÇÃO DE ESPESSURA

No subcapítulo anterior, foram apresentados e discutidos os resultados numéricos obtidos não considerando uma restrição associada ao fabrico dos componentes. No entanto, após uma tentativa de produção das microvigas aferiu-se a impossibilidade de as produzir devido à existência de zonas interiores reticuladas ou zonas de rebordo com espessura a rondar 0,1 mm.

Os resultados acima discutidos das microvigas seriam então num cenário perfeito, mas como não foi possível produzir, quiçá no futuro, foram então efetuadas novas otimizações considerando a restrição associada à condição de fabricação. O valor assegurado para a restrição de fabricação foi de 0,3 mm de espessura, valor este aparentemente possível, tendo em consideração projetos já realizados com esta espessura.

De notar que, tal como no estudo presente no subcapítulo anterior, após a realização da otimização topológica nos dois modos, *Static Structural* e Modal, foram comparadas as formas resultantes dos dois métodos dado que as respostas obtidas foram distintas. Esta análise possibilitou desta forma, perceber qual o melhor método de otimização, estático ou modal. Para tal, construíram-se os gráficos referentes aos valores alcançados de rigidez estática e dinâmica, desta vez apenas para o caso da microviga com 5 mm de espessura.

Em ambas as análises, estática e modal, realizaram-se as otimizações até idealmente 20% da massa original da microviga porque tanto nos 25% como nos 20% na análise estática todas as treliças já tinham menos de 0,3 mm de espessura e, inclusive nestes casos houve a necessidade de acrescentar material. Como tal, achou-se que não havia necessidade de retirar mais material, para 15% por exemplo, porque iria ter de se retificar a espessura de todas as treliças e, certamente, pelas restrições não seria possível atingir essa percentagem devido à possibilidade do programa entrar em conflito. Isto é, por um lado querer tirar material, mas por outro lado, querer manter a restrição imposta de 0,3 mm e não conseguir assim retirar tanto.

Assim, na primeira análise com esta restrição imposta fez-se uma avaliação da rigidez estática para o caso da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com a otimização feita nos dois modos já referidos, *Static Structural* e Modal. O gráfico desta análise encontra-se apresentado na Figura 4.41.



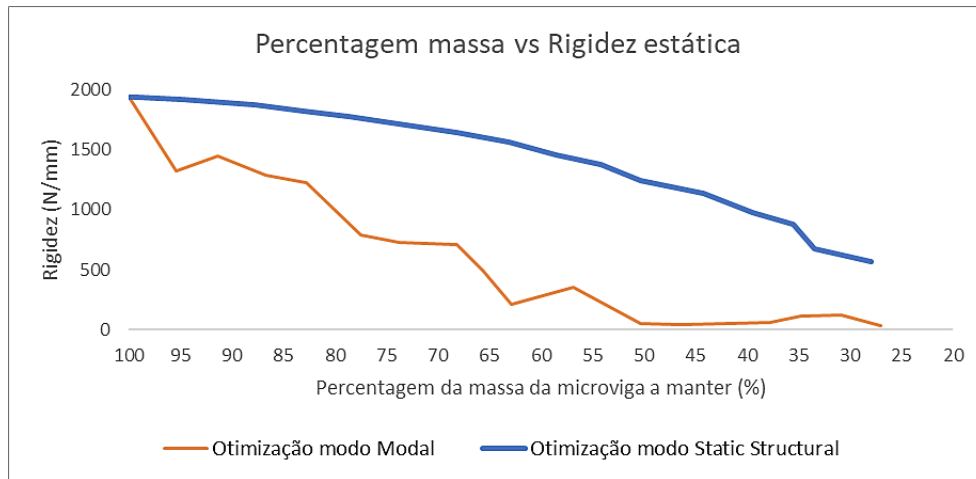


Figura 4.41 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática, com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de espessura.

No que diz respeito a este estudo de rigidez estática, as topologias efetuadas no modo *Static Structural* revelaram-se sem dúvida melhores. O que se averigua é que, analisando do ponto de vista estático, há um resultado mais fraco ao nível da otimização das microvigas efetuada no modo Modal.

Através da análise das topologias obtidas no modo *Static Structural* constatou-se que, na sua maioria, estas apresentam estruturas reticuladas bem definidas, já com alguma complexidade geométrica e as suas células unitárias distribuídas de forma não periódica com diferentes formas e tamanhos. Na Figura 4.42 encontra-se então apresentada uma das topologias obtidas no modo *Static Structural* que apresenta uma geometria eficiente e interessante, com apenas 54% da massa original e, que pode demonstra assim a possibilidade de minimizar a quantidade de material da microviga, otimizando ao mesmo tempo as propriedades mecânicas pretendidas, rigidez, amortecimento e resistência.

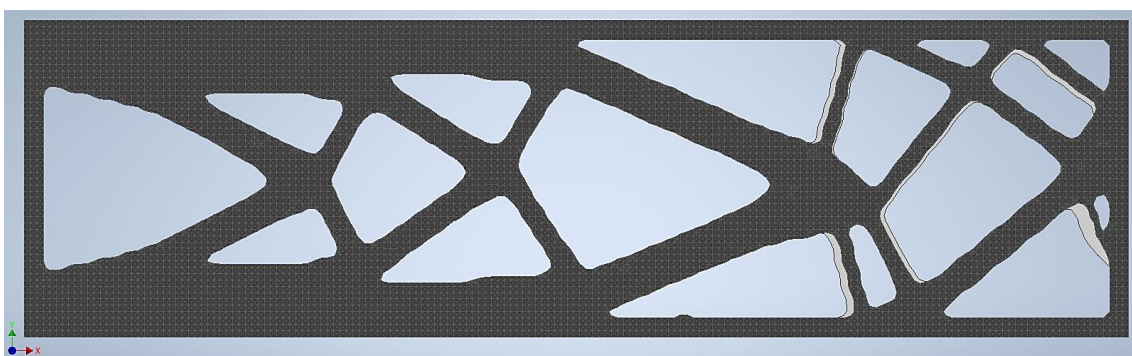


Figura 4.42 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura.

De maneira mais fundamentada, a compreensão do comportamento do gráfico da Figura 4.41 pode ser feita recorrendo à análise mais detalhada de três estudos diferentes. Um primeiro estudo onde

se explica a superioridade dos resultados das topologias obtidas no modo *Static Structural*, outro onde se foca mais nas variações dos resultados da rigidez estática nas topologias resultantes do modo Modal e, por último, um cenário onde a diferença dos valores de rigidez estática entre as topologias dos dois modos já começa a ser atenuado.

No que concerne ao primeiro caso, serve de exemplo a comparação das microvigas com cerca de 50% da massa original. Através da Figura 4.43 averigua-se que com a otimização no modo *Static Structural* a estrutura encontra-se muito bem definida e interligada, típica de uma estrutura *lattice*, com uma distribuição não periódica, mas uma boa distribuição de material. Pelo contrário, pela Figura 4.44 verifica-se que com a otimização no modo Modal, tal como já mencionado várias vezes, o processo de otimização destas microvigas começa por reduzir a sua massa na extremidade livre. Ou seja, há uma perda concentrada de material junto da extremidade livre tornando a microviga otimizada pelo método modal mais suscetível de se deformar aquando da avaliação da sua rigidez estática, tal como é evidente pela comparação da área assinalada a vermelho em ambas as figuras.

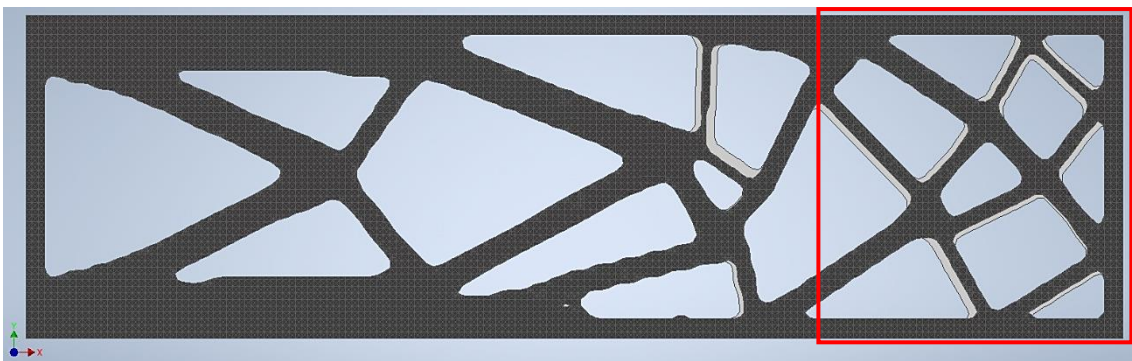


Figura 4.43 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura.

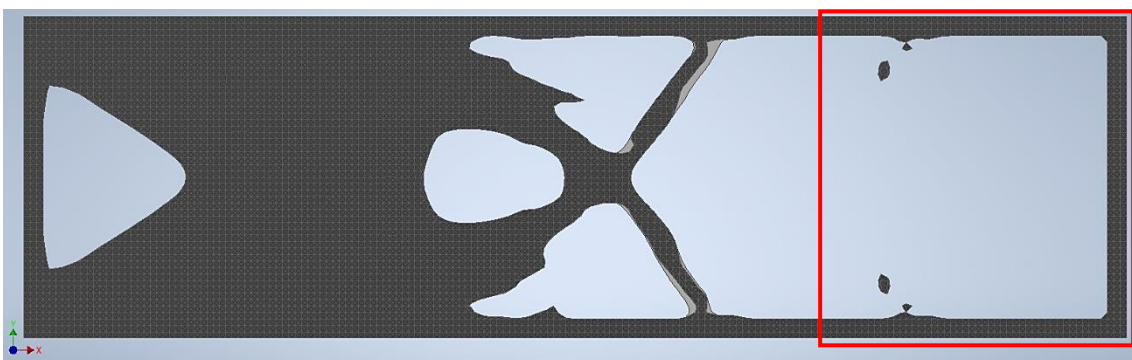


Figura 4.44 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

Explorado e já entendido os motivos dos bons resultados da rigidez estática por parte das otimizações topológicas realizadas no modo *Static Structural* pretende-se agora analisar a oscilação dos resultados da rigidez estática das topologias resultantes do modo Modal evidentes no gráfico da Figura

4.41. Para tal, pode servir como exemplo uma das situações do declínio de rigidez estática presente entre a microviga com 68% e 62% da massa original, apresentadas na Figura 4.45 e Figura 4.46, respetivamente.

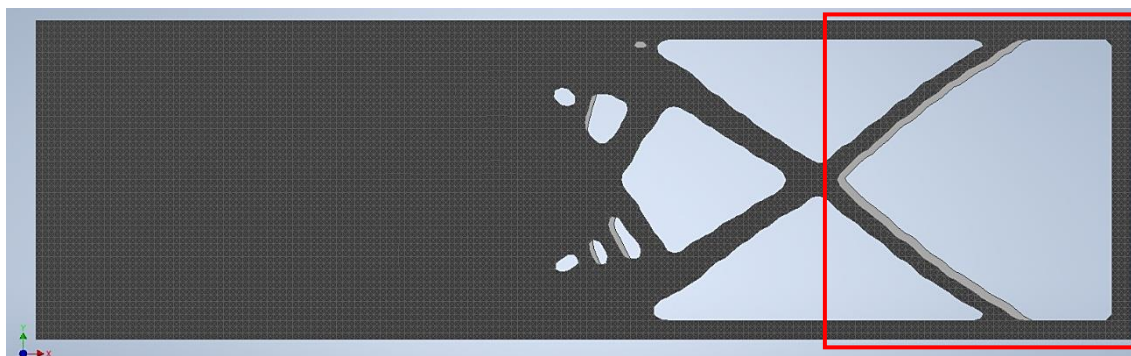


Figura 4.45 - Topologia da microviga de 5 mm com 68%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

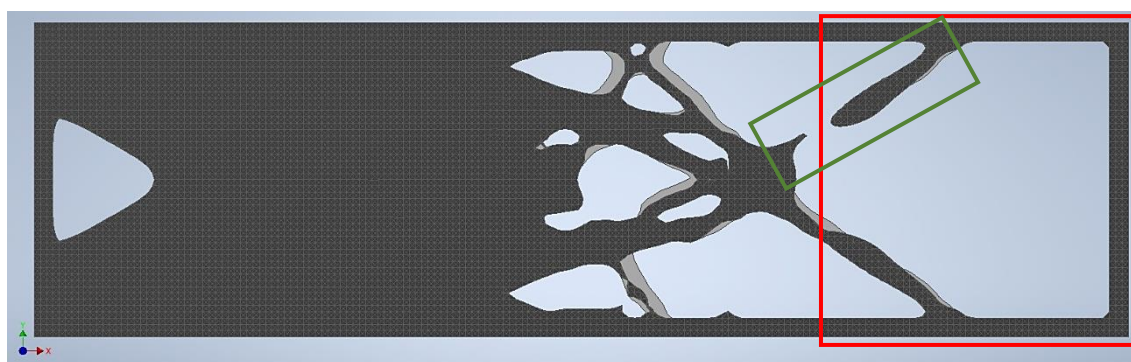


Figura 4.46 - Topologia da microviga de 5 mm com 62%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

Verifica-se através da Figura 4.45 que a otimização com 68% da massa original apresenta uma estrutura satisfatória, com ligação de material perto da região da extremidade livre, embora com uma área, assinalada a vermelho, que já demonstra um decréscimo de massa circunscrito, apesar de ainda não fragilizar muito a microviga dada à consistência das estruturas reticuladas e da localização das mesmas.

Já a microviga otimizada com 62% da massa original contém uma falha interior de ligação de material o que implica diretamente uma diminuição da rigidez estática, daí o decréscimo visível no gráfico da Figura 4.41.

Assim, estes comportamentos oscilatórios presentes nas microvigas otimizadas no modo Modal dizem respeito a situações semelhantes à anterior relatada, ou seja, situações de perda acentuada de material junto à extremidade livre ou falhas de ligação de material em zonas reticuladas.

Por último, é igualmente interessante observar que, nos casos das microvigas otimizadas pelo método estático e modal com menor percentagem de massa, a diferença dos seus valores de rigidez

estática já começa a ser atenuada entre as topologias dos dois modos. O que se verifica é que a topologia efetuada no modo Modal apresenta uma posição e arranjo das treliças benéfico para a aplicação da carga, pese embora peque pela escassez de material junto da extremidade livre, tal como se comprova na Figura 4.48. Em relação à topologia realizada no modo *Static Structural* esta revela-se ainda assim melhor, do que a efetuada no modo Modal, em termos de rigidez estática dada a permanência de zonas de ligação interior de material com a área fronteira de aplicação de carga, tal como se encontra assinalado na Figura 4.47.

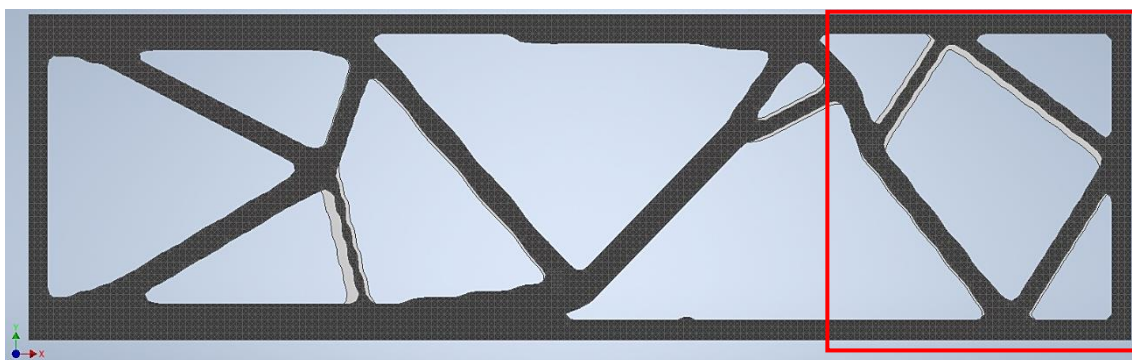


Figura 4.47 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura.

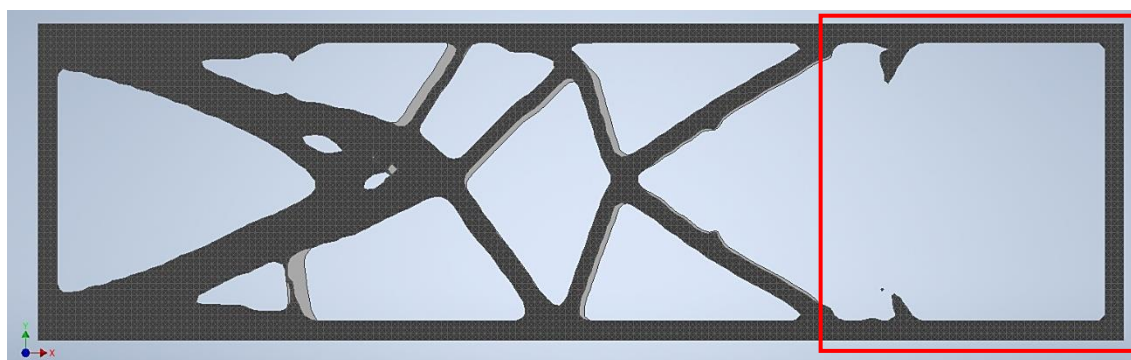


Figura 4.48 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

Além do que se analisou, torna-se pertinente avaliar a relação de rigidez sobre a massa, visto que, o mais relevante é conseguir obter bons resultados de rigidez, mas com a menor massa possível da microviga. O gráfico com esta análise encontra-se então apresentado na Figura 4.49.

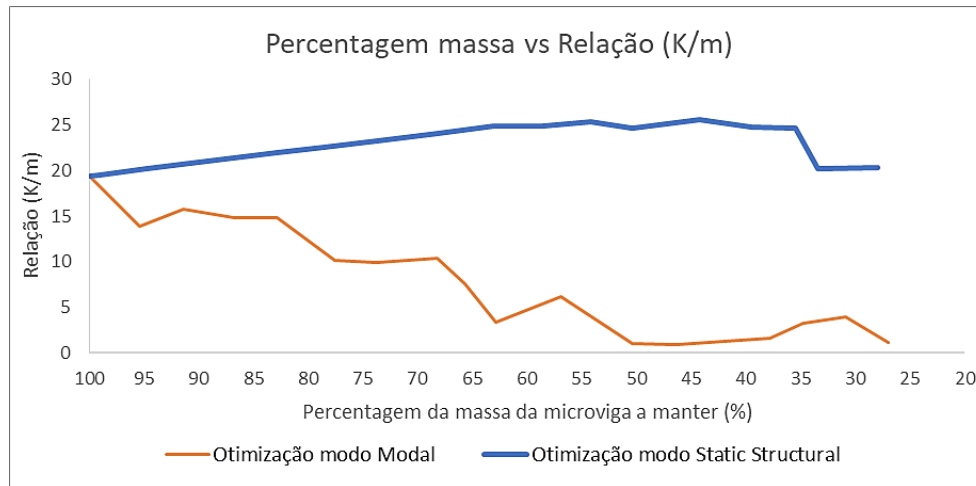


Figura 4.49 – Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de espessura.

Verifica-se assim que, para além de ser com a otimização do método estático que se obtém valores consideravelmente superiores de rigidez estática é, também com ele que se consegue uma melhor relação de K/m em todas as formas obtidas nas sucessivas otimizações de redução de massa, tal como se constata pelo gráfico exibido na Figura 4.49.

Este resultado pode ser explicado, uma vez mais, pelo facto de as topologias obtidas no modo Modal apresentarem uma grande retirada de material junto da região da extremidade livre, que influencia e vai propiciar resultados mais fracos, tanto ao nível da rigidez estática como da sua relação de K/m.

A topologia que apresenta assim o maior destaque dos resultados otimizados exibindo a melhor relação de K/m, encontra-se visível na Figura 4.50.

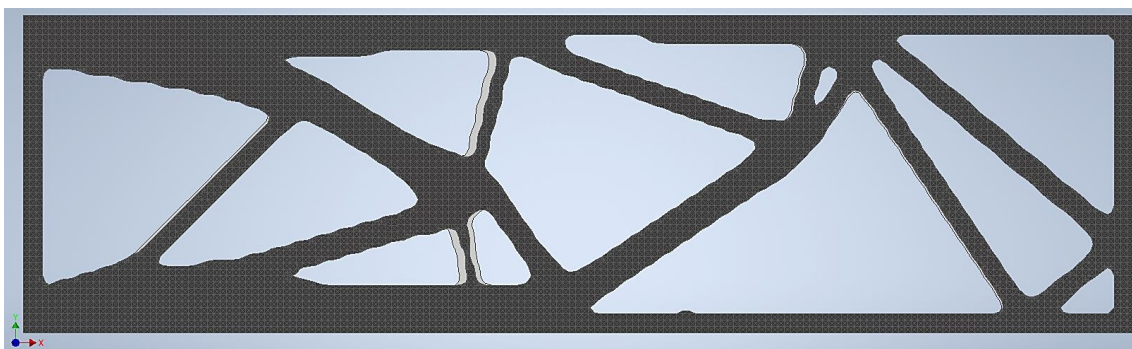


Figura 4.50 - Topologia da microviga de 5 mm com 44%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura.

Observando a topologia acima exibida constata-se que a microviga em causa se traduz numa estrutura com grande redução de peso, porosa e com uma disposição das células unitárias que variam no seu tamanho geométrico e na sua geometria nas diferentes áreas, o que permitirá absorver energia eficazmente em diferentes direções, sendo isto algo pretendido numa estrutura *lattice*.

Tal como já havia sido feito anteriormente, no estudo numérico sem a restrição de espessura, procedeu-se igualmente à avaliação da rigidez estática entre as microvigas otimizadas pelo método estático e o modal com massa concentrada de 1 kg, dado terem também sido realizadas as otimizações no modo Modal com massa concentrada na extremidade livre da microviga com 5 mm de espessura. O objetivo deste estudo passou então por aferir se a colocação desta massa concentrada poderia propiciar melhores resultados ao nível da rigidez estática do que o estudo anterior e possibilitar uma distribuição mais uniforme aquando da remoção de material. Os resultados encontram-se evidenciados na Figura 4.51.

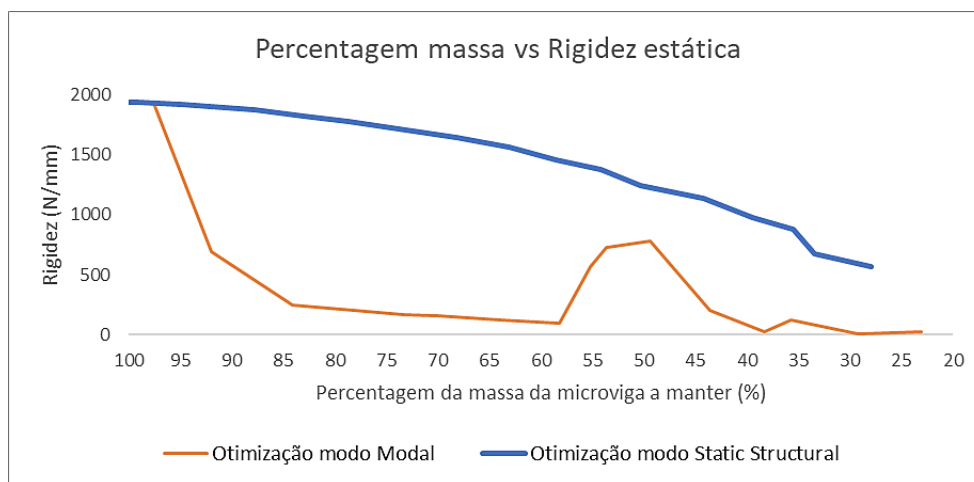


Figura 4.51 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal, com restrição de espessura.

Dado que os resultados do modo *Static Structural* já foram anteriormente abordados torna-se pertinente agora dar maior ênfase aos resultados obtidos a partir do modo Modal.

Procedendo à análise do gráfico acima exibido, verifica-se que os resultados com a otimização do método modal não melhoraram os seus valores de rigidez estática até à microviga com cerca de 59% da massa original, isto comparando com os resultados sem a massa concentrada expressos na Figura 4.41. Assim, para compreender então o motivo destes resultados, serve como exemplo, a topologia do modo Modal referente à percentagem de massa de 71%.

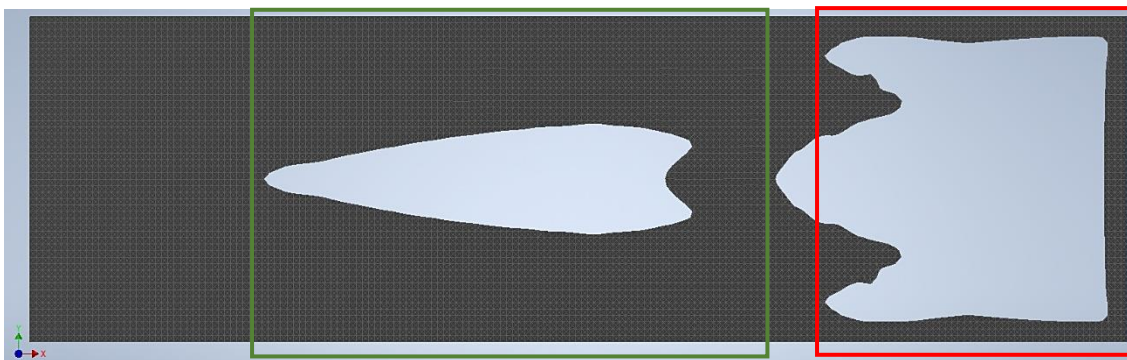


Figura 4.52 - Topologia da microviga de 5 mm com 71%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura.

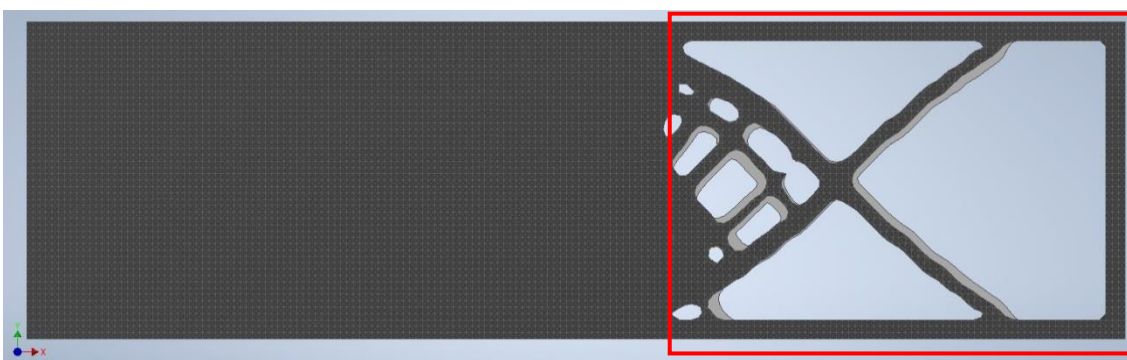


Figura 4.53 - Topologia da microviga de 5 mm com 71%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura.

Tal como se pode analisar, ao contrário do que se constatava nas topologias obtidas pelo método modal sem a massa concentrada, agora a aplicação de massa permitiu a remoção de material já numa zona relativamente perto da extremidade fixa da microviga, como é perceptível pela área assinalada a verde na Figura 4.52. Ou seja, realizando o processo de otimização, a remoção de material não se concentrou somente junto da extremidade livre, ao contrário do que acontece nas microvigas sem a colocação de uma massa concentrada, tal como se observa na Figura 4.53.

No entanto, ainda que o processo de otimização seja mais equilibrado com a colocação de um componente, verifica-se pela Figura 4.52 que há também uma perda concentrada de material junto da região da força exterior aplicada e sem zonas reticuladas, daí a existência de variações significativas de rigidez.

Através do gráfico acima apresentado, é ainda possível constatar que, há uma melhoria dos resultados com a otimização do método modal a partir da microviga com aproximadamente 54% da massa original, destacando-se com o melhor valor de rigidez estática a microviga reticulada com cerca de 50%, representada esta na Figura 4.54.

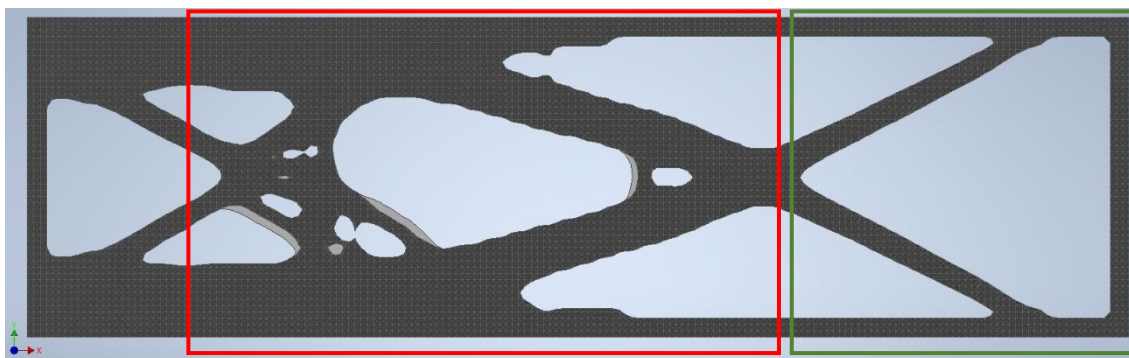


Figura 4.54 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura.

A microviga acima representada demonstra ser uma estrutura com boa coesão e interligação das zonas reticuladas e, uma distribuição mais homogeneizada do material e das zonas porosas, evidenciado a vermelho, ao contrário do caso da otimização efetuada no Modal sem aplicação de um componente de massa, já mostrado na Figura 4.44. Além do mais, tal como é sabido uma das propriedades das estruturas reticulares está diretamente relacionado com a disposição das células unitárias e, para o caso acima analisado, a existência de uma zona reticular junto à zona de emprego de força externa, assinalado a verde, vai permitir que a microviga reticulada se deforme menos e, conseqüentemente, apresente um bom comportamento ao nível da rigidez.

De notar ainda que, aos 54% e 35% observam-se no gráfico da Figura 4.51 pequenas subidas e, portanto, resultados favoráveis, dado que nestas geometrias otimizadas as microvigas apresentam ligação de material com a extremidade da aplicação da força ou muito próxima desta.

Em relação ao caso de 54%, verifica-se igualmente um bom resultado ao nível da rigidez estática dado que, ao contrário do que sucede com as topologias otimizadas até percentagem de massa de 59%, a estrutura presente na Figura 4.55, apresenta zonas reticuladas e ligação de material com a região fronteira da microviga e junto da zona de aplicação da força. Esta microviga reticulada apresenta do ponto de vista geométrico um arranjo interessante do material e da sua porosidade, nomeadamente na área sinalizada a vermelho. No entanto, existem também falhas, assinaladas a verde, que influenciam um pouco o resultado quando comparado com os resultados da otimização pelo método estático. Além do mais, junto da extremidade livre da viga não há tantas zonas treliçadas tornando essa área menos eficiente do ponto de vista do comportamento estrutural, quando equiparado uma vez mais ao caso do método estático, Figura 4.42.



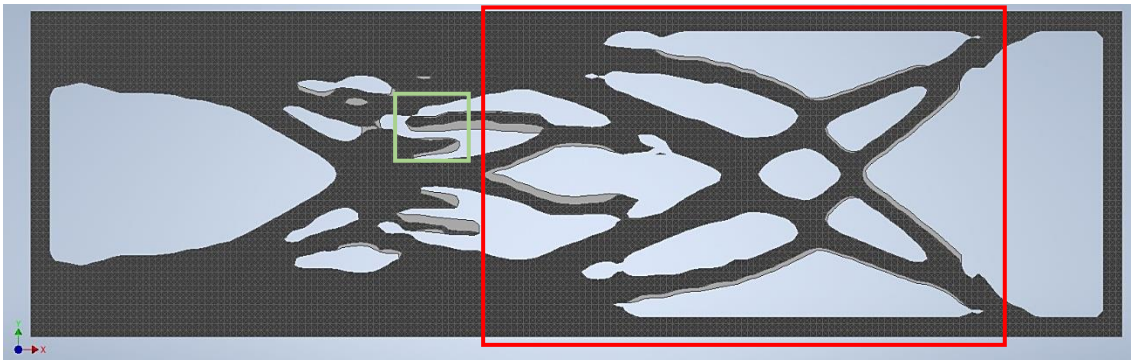


Figura 4.55 - Topologia da microviga de 5 mm com 54%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura.

No que diz respeito ao caso da microviga com 35%, verifica-se que esta apresenta pouca densidade de material no interior da microviga, constata-se a inexistência de zonas reticuladas na área interior, não possibilitando um bom arranjo estrutural e geométrico do material tal como se encontra assinalado a vermelho na Figura 4.56. Desta forma, apresenta assim um resultado mais fraco ao nível da rigidez estática do que o caso anterior, pese embora a sua melhoria de comportamento é conseguida devido à ligação reticulada de material com a zona de emprego da força exterior, tal como se encontra indicado a verde.

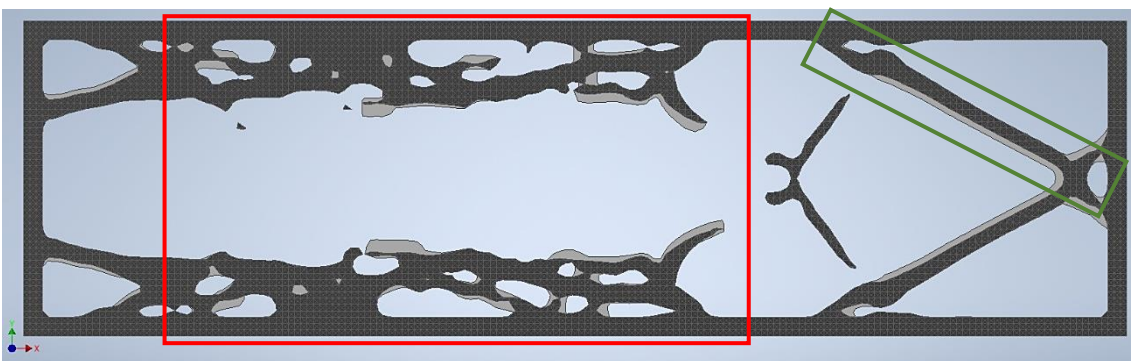


Figura 4.56 - Topologia da microviga de 5 mm com 35%, com otimização no modo Modal, com massa concentrada, com restrição de espessura.

De referir que apesar do incremento presente em alguns dos resultados, em todas as análises de redução de massa as topologias efetuadas através do modo *Static Structural* apresentam uma vez mais melhores resultados, mesmo com a colocação de um componente de massa.

Novamente, torna-se imperativo analisar a relação de rigidez sobre a massa, dado o interesse de conseguir bons resultados ao nível da rigidez com a menor massa possível da microviga, estando assim os resultados deste estudo expressos na Figura 4.57.

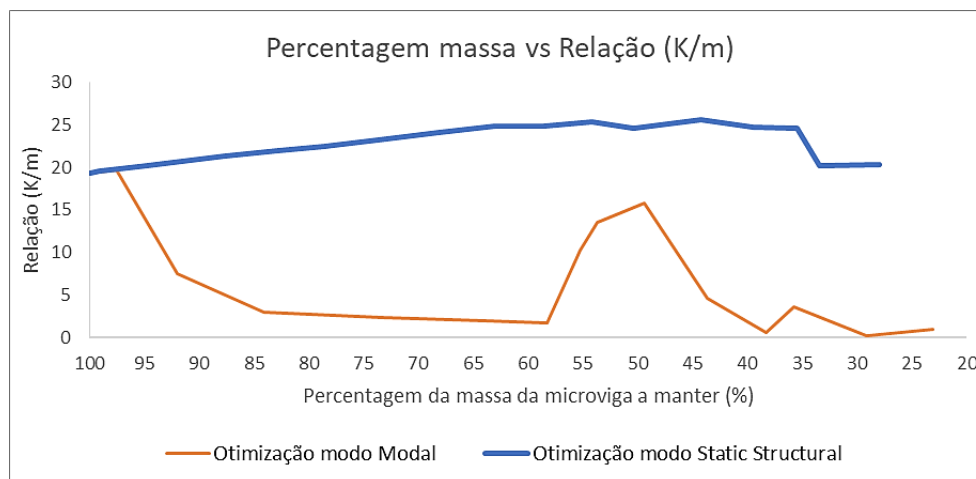


Figura 4.57 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com massa concentrada no modo Modal, com restrição de espessura.

Verifica-se, tal como no estudo anterior que, para além de ser com a otimização do método estático que se obtém valores superiores de rigidez estática é, também com ele que se consegue uma melhor relação de K/m em todas as formas reticuladas obtidas nas sucessivas otimizações de redução de massa. Apesar disso, não deixa de ser importante salientar o bom resultado alcançado na microviga com cerca de 50% da massa original onde se recorreu ao método modal, representada na Figura 4.54, sendo esta a estrutura destacável pelo método modal, tal como se comprova pelo gráfico da Figura 4.57.

Pelo método estático evidencia-se com a melhor relação de K/m a estrutura com 44% da massa original, tal como já foi abordado, na Figura 4.50.

Estas duas estruturas sobressaem assim pela capacidade de conseguirem manter a integridade estrutural das ligações reticuladas mesmo com a conjuntura da redução de massa, razão esta que leva ao interesse pelo estudo deste tipo de estruturas *lattice*, que permitem aliar as propriedades mecânicas com inteligentes orientações geométricas que proporcionam maior rigidez, relação força/peso e boa capacidade de absorção de energia.

Depois de avaliados os resultados da rigidez estática, averiguou-se também os resultados ao nível da rigidez dinâmica de forma a poder fazer também algumas comparações e retirar conclusões.

Para tal, fez-se então uma avaliação da rigidez dinâmica para o caso da microviga de 5 mm de espessura, com a otimização feita nos modos Modal e *Static Structural*. O gráfico da Figura 4.58 mostra então os resultados obtidos.

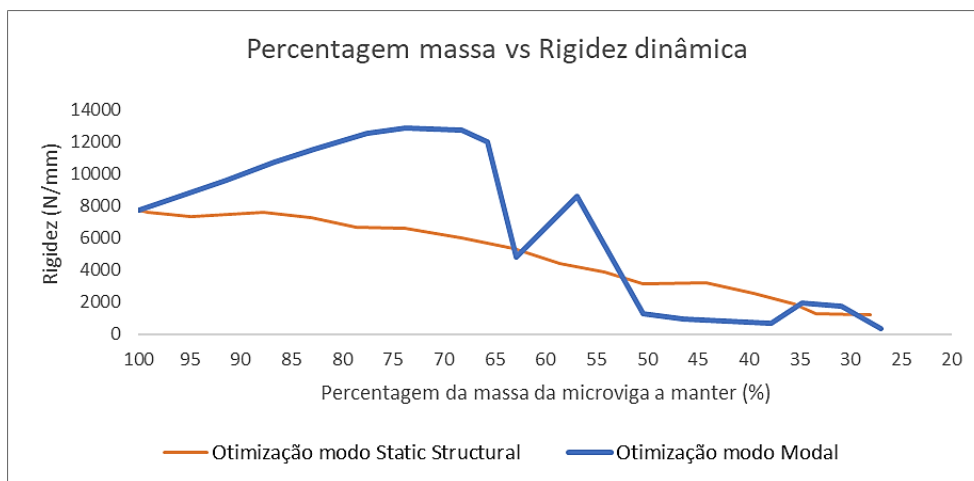


Figura 4.58 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de espessura.

O gráfico apresentado acima permite observar que em termos de rigidez dinâmica, a topologia efetuada no modal consegue ser melhor em mais de metade das formas obtidas e, é nesta topologia em que se obtém o valor máximo de rigidez dinâmica.

Através da observação do gráfico da Figura 4.58, verifica-se uma primeira inversão do comportamento das topologias obtidas pelo método modal aos 62%. Muito provavelmente, sem a falha de ligação de material da estrutura reticulada na microviga com 62% da massa original, já apresentada na Figura 4.46, o seu valor de rigidez dinâmica obtido pela otimização feita no modo Modal seria superior e ultrapassaria o da forma obtida pelo modo *Static Structural*, extinguindo esse primeiro pico negativo visualizado no gráfico.

Apesar da superioridade dos valores de rigidez dinâmica obtidos pelas otimizações feitas no modo Modal, a rondar os 52% verifica-se que ocorre uma mudança de comportamento. Isto é, as geometrias das vigas otimizadas obtidas no modo *Static Structural* apresentam valores superiores de rigidez dinâmica devido, provavelmente, ao facto de as estruturas reticuladas obtidas no modo *Static Structural* apresentarem uma melhor distribuição e arranjo do material do que no modo Modal, ou seja, sem uma perda excessiva e concentrada de material na extremidade livre das microvigas que potenciam a diminuição da frequência do primeiro modo de vibração.

Um dos exemplos que acaba por comprovar e a corroborar com o que foi acima explicado, diz respeito às topologias das microvigas com 50% da massa original conseguidas através do método estático e modal, que se encontram apresentadas na Figura 4.43 e Figura 4.44, respetivamente.

Uma vez mais a explicação e análise da fragilização de material, acima abordada, associada particularmente à otimização realizada no modo Modal pode ser verificada analisando os resultados da análise modal da microviga em causa, visualizando os seus modos de vibração.

O que observa é que na topologia da microviga efetuada pelo método modal, logo no primeiro modo de vibração ocorre flexão, mas somente associada à região de ausência de material, tal como é verificado na Figura 4.59, com uma frequência natural de 7259 Hz.

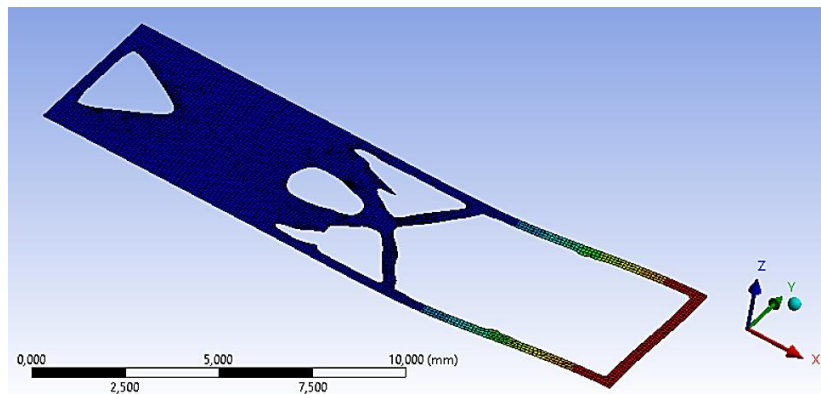


Figura 4.59 Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura - 1º modo de vibração.

De notar que, apenas no segundo modo de vibração é que ocorre o comportamento de flexão associado a toda a microviga, tal como é evidenciado na Figura 4.60, com uma frequência natural de 18377 Hz. Comprova-se assim que, a perda concentrada de massa junto da região da extremidade livre, favorece uma maior fragilização da microviga.

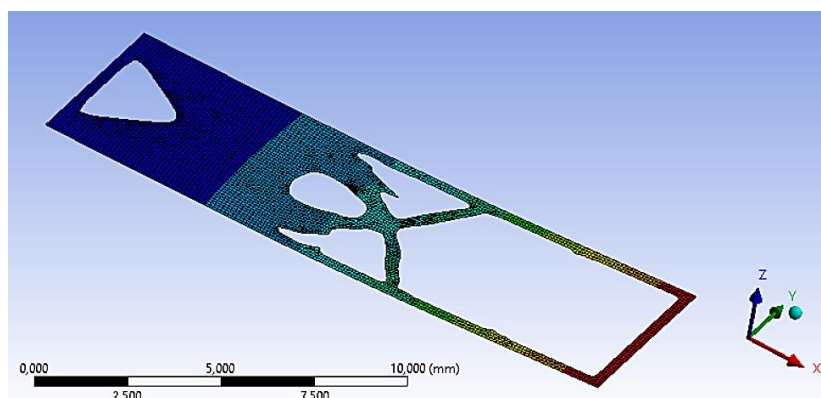


Figura 4.60 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo Modal, com restrição de espessura - 2º modo de vibração.

Comparando agora com a topologia otimizada pelo método estático nota-se que no primeiro modo de vibração toda a microviga está submetida a flexão, e não nenhuma zona em particular, tal como está explícito na Figura 4.61, sendo a sua frequência natural de 11508 Hz.

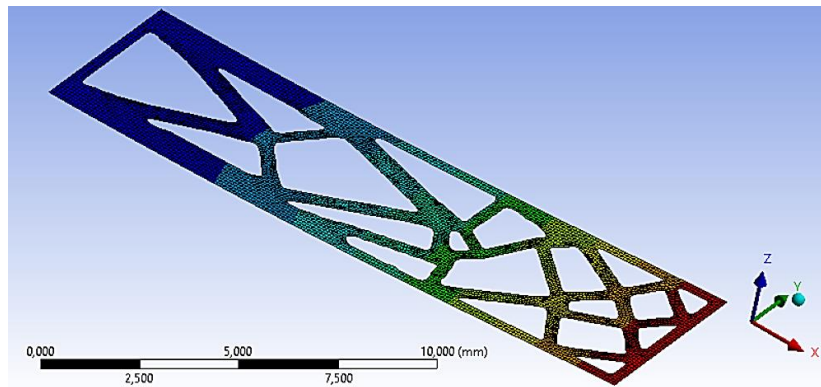


Figura 4.61 - Topologia da microviga de 5 mm com 50%, com otimização no modo *Static Structural*, com restrição de espessura - 1º modo de vibração determinado em análise Modal (subsequente).

Comparando desta forma, o resultado da frequência natural do primeiro modo de vibração de ambas as microvigas, com otimização no modo *Static Structural* e Modal, constata-se que este valor é mais elevado na topologia obtida pelo método estático. Isto demonstra que, esta estrutura reticulada ao apresentar várias treliças vai proporcionar uma maior estabilidade junto da zona da extremidade livre e levar a que apresente valores de frequências naturais mais elevados devido à maior rigidez da estrutura. Portanto o valor da frequência natural é mais baixo na topologia obtida pelo método modal em resultado da ausência de material concentrada na extremidade livre, demonstrando uma maior deflexão da estrutura.

Para além de avaliar os resultados ao nível da rigidez dinâmica, torna-se, uma vez mais pertinente, analisar a relação de rigidez sobre a massa, devido à importância de perceber o seu comportamento. Os resultados deste estudo encontram-se assim apresentados na Figura 4.62.

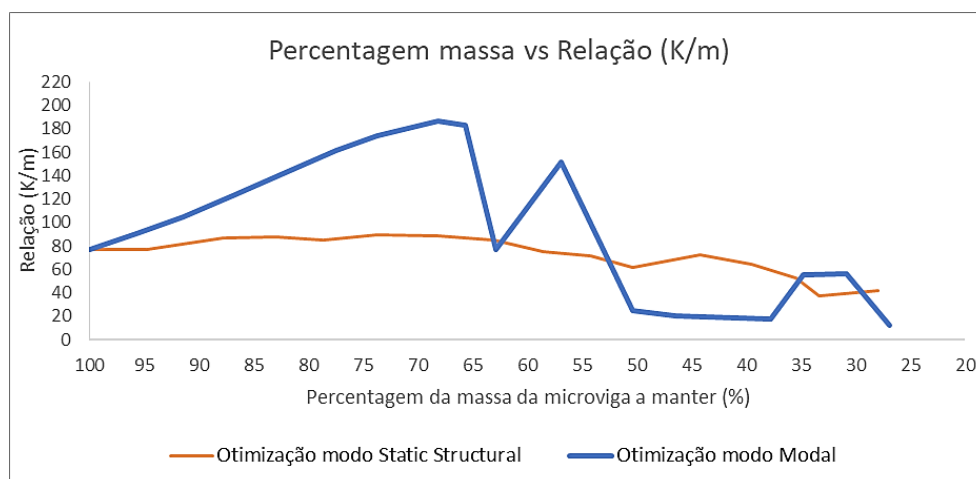


Figura 4.62 - Gráfico comparativo da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de espessura.

Constata-se através da visualização do gráfico da Figura 4.62 que, para além de ser com a otimização modal que se consegue um melhor valor de rigidez dinâmica, é também com esta que se obtém um valor mais elevado da relação de  $K/m$ , ainda que com a otimização no modo estático se encontrem valores desta relação superiores aos obtidos no modo Modal pelos motivos acima já descritos e analisados.

Assim, após as diversas conclusões e análises desenvolvidas e aprofundadas ao longo deste subcapítulo é possível proferir duas reflexões em relação às análises estáticas e dinâmicas de microvigas, sob condições fronteira e de carregamento iguais às aplicadas no presente trabalho, sendo que estas vão exatamente de encontro às que foram expressas no subcapítulo anterior.

Quando for necessário realizar um estudo estático e analisar microvigas, ao nível da rigidez estática basta realizar a otimização topológica no modo *Static Structural*, dado ter sido neste modo que se verificaram os melhores valores de rigidez estática e relações de  $K/m$ . Ou seja, as formas das microvigas otimizadas nesse modo são as mais promissoras para um estudo estático.

Por outro lado, na eventualidade de se querer analisar a rigidez dinâmica das microvigas, talvez seja relevante realizar os dois estudos, otimização pelos métodos estático e modal, dado que ambos apresentaram resultados interessantes ao nível de rigidez dinâmica e das relações de  $K/m$ , sendo assim pertinente fazer uma avaliação com os dois métodos de otimização.

### **4.3. RESULTADOS DA FABRICAÇÃO**

Após todo o processo e etapas envolvidas na produção foram então obtidas as microvigas treliçadas metálicas. Na Figura 4.63 encontram-se assim representados os resultados das duas microvigas reticuladas metálicas otimizadas pelo método estático.

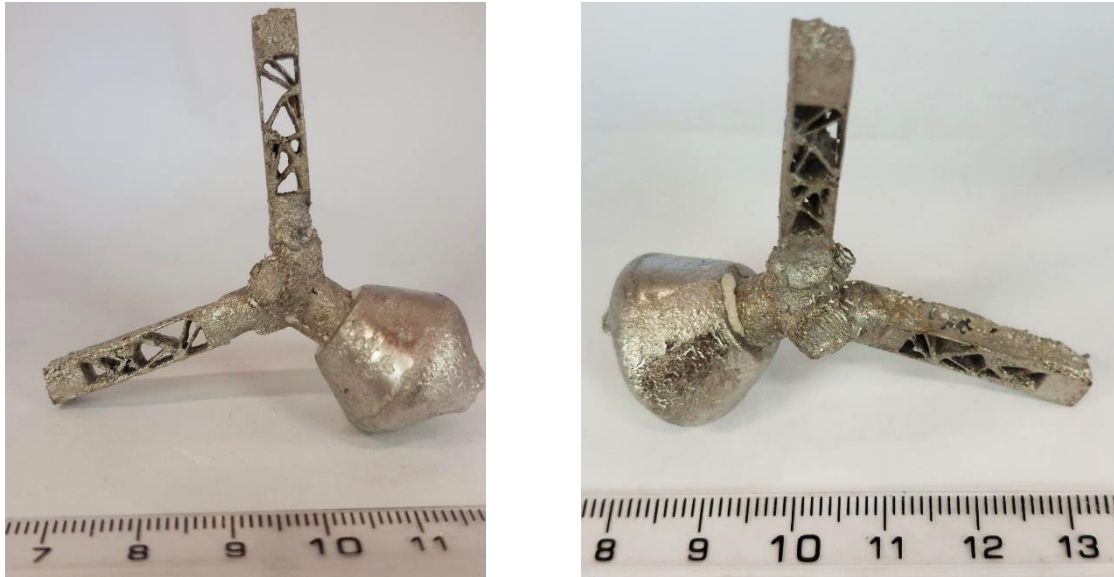


Figura 4.63 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método estático.

Através da análise das figuras apresentadas anteriormente verificou-se que as microvigas conseguiram atingir de forma minimamente satisfatória as zonas treliçadas interiores, no entanto, pela Figura 4.63 da direita, observou-se que na zona lateral houve falhas de material.

No que diz respeito aos resultados das duas microvigas reticuladas metálicas otimizadas pelo método modal, estes encontram-se representados na Figura 4.64. Aquilo que se constata pelos seus resultados é que uma das microvigas ficou quebrada devido ao processo de remoção do gesso. Já a outra microviga, embora tenha evidenciado alguma estrutura reticulada, verificaram-se muitas falhas de material quer ao nível das ligações interiores, como nas zonas laterais da microviga.



Figura 4.64 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método modal.

Quanto à Figura 4.65, nesta está representada a microviga que foi fundida com cacho de uma só ramificação, e, pese embora ainda com alguns defeitos apresentou uma estrutura mais proveitosa que as analisadas na Figura 4.64. Verificou-se assim que foi conseguida uma estrutura coesa ao nível das zonas reticuladas no seu interior, mas nas zonas laterais voltou a estar fragilizada pela ausência de material em determinadas zonas.

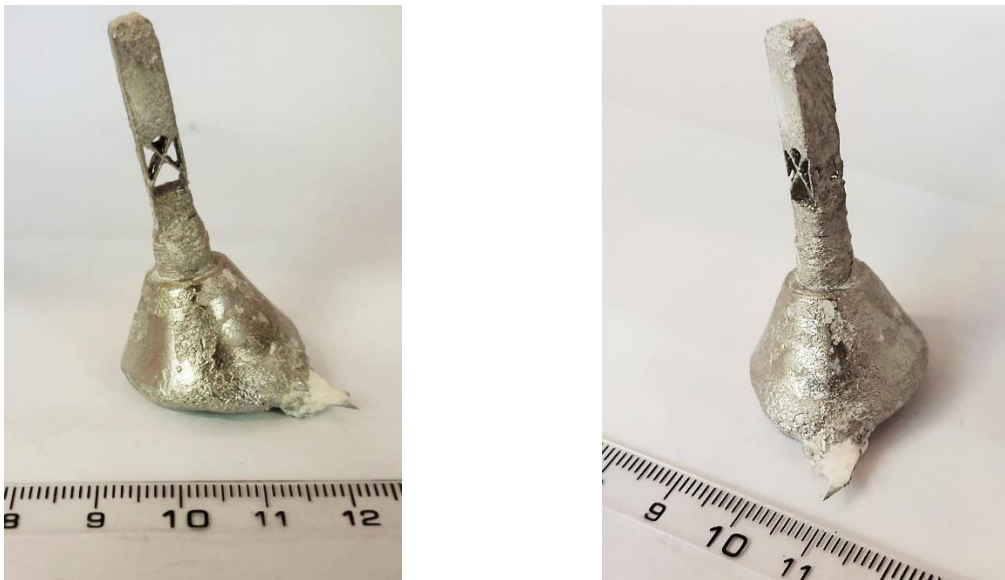


Figura 4.65 - Ângulos diferentes da microviga metálica otimizada pelo método modal, com ramificação única do cacho.



Na Figura 4.66 encontram-se representados os resultados das duas microvigas reticuladas metálicas otimizadas pelo método estático, obtidas com o auxílio da construção dos microcanais. Através da observação das figuras verificou-se que as microvigas conseguiram atingir as zonas treliçadas no interior ainda que não com o rigor desejado, porém observaram-se, uma vez mais, falhas de material nas zonas laterais.



Figura 4.66 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método estático, com contribuição dos microcanais projetados.

Por último, na Figura 4.67 encontram-se representados os resultados das duas microvigas reticuladas metálicas otimizadas pelo método modal, obtidas com o auxílio da construção dos microcanais.



Figura 4.67 - Ângulos diferentes das duas microvigas metálicas otimizadas pelo método modal, com contribuição dos microcanais projetados.

O que se pode constatar dos resultados obtidos é que, a microviga localizada à esquerda do cacho apresentou resultados fracos, dada a grande falta de material não só nas zonas laterais como no interior das zonas reticuladas. Já a microviga localizada à direita do cacho mostrou resultados melhores ao nível das zonas interiores otimizadas, ainda que, de igual forma, tenha apresentado falhas nas laterais.

Assim, de forma sucinta e generalizada, visualizando todos os resultados das microvigas reticuladas fundidas anteriormente apresentadas, verificou-se em todas as microvigas a existência de alguns problemas e defeitos. É sabido que a classificação de defeitos de fundição não é fácil até porque muitas vezes um defeito tem mais que uma causa associada. Mas, aquilo que se observa a olho nu é, de uma forma geral, a existência de zonas reticuladas incompletas e, nas zonas da superfície lateral das microvigas falta de material, causado assim alterações significativas nas microvigas produzidas.

A causa associada a esta falta de material em algumas zonas das microvigas pode dever-se a alguns problemas que possam ter ocorrido e impedido a eliminação completa do modelo de sacrifício. Ou seja, pode ter ficado alguns vestígios acumulados nos canais e, portanto, a espessura das zonas reticuladas ao invés de ter uma dimensão mínima de espessura de 0,3 mm ter menos, o que gera grande dificuldade de fabricar estas peças metálicas. Ou seja, aquilo que se pode concluir é que esta tecnologia de fabrico sugerida para a produção das microvigas metálicas ainda não permite fabricar facilmente este tipo de estruturas com as espessuras requeridas.

Na eventualidade de continuação do presente trabalho, o estudo poderia passar por melhorar alguns aspetos associados ao processo de fundição em si. Passaria então por utilizar nos novos estudos somente o cacho com ramificação única onde a liga é vazada diretamente para uma só microviga, ou então, o cacho com a construção dos canais auxiliares, visto terem sido nestes dois casos de estudo em que se obtiveram melhores detalhes nas zonas reticuladas. Outro aspeto que poderia ser mais desenvolvido e analisado no futuro, é o tema da queima das resinas, quer pela tentativa de melhor queima em si, quer pela melhoria dos ciclos térmicos para a sua eliminação. Estes aspetos associados à resina devem ser assim mais desenvolvidos, dado que possivelmente foram problemas fulcrais que impediram de se obter resultados mais satisfatórios, como se pretendia.

Assim, devido aos resultados obtidos das microvigas fundidas, achou-se que não seria benéfico e proveitoso prosseguir com a realização dos ensaios mecânicos estáticos/dinâmicos para validação experimental das topologias obtidas, uma vez que, os resultados infelizmente não iriam ser satisfatórios e cumprir os propósitos da sua realização.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO

As estruturas treliçadas têm recebido atenção significativa junto da comunidade científica devido às suas propriedades atrativas, tais como alta resistência e rigidez específicas, baixo peso, e a capacidade das suas estruturas internas absorverem uma força de impacto externa. Atualmente, os projetos estruturais centram-se principalmente na redução do peso e na obtenção de elevado desempenho dos produtos. Portanto, a utilização de estruturas treliçadas vem fomentar o interesse da sua aplicabilidade em diferentes ramos com necessidade constante de melhoramento de comportamentos estruturais.

Estudos diversos associados a estruturas *lattice* 3D e a otimização das suas respetivas células unitárias têm vindo a ser feitos dado o grande interesse. No entanto, microestruturas *lattice* 2D, considerando o comportamento estático e dinâmico, é algo que pode igualmente ser pertinente para diversas aplicações em termos da resistência estrutural e amortecimento.

A dissertação, que foi aqui apresentada, parte então do interesse de estudar e fomentar o estudo deste tipo de microestruturas 2D. Para tal, encontram-se no Subcapítulo 3.1 da Metodologia numérica os diversos estudos numéricos realizados, recorrendo à ferramenta *Topology Optimization* do *Ansys* nos dois modos, *Static Structural* e Modal, com o objetivo de deduzir formas reticuladas das microvigas. Fizeram-se rotinas de otimização de forma a reduzir a massa e avaliar como varia a rigidez das estruturas aquando do processo de obtenção de estruturas reticuladas.

Um aspeto crucial que se inferiu aquando deste procedimento numérico foi a impossibilidade de validação das diversas microvigas otimizadas de forma direta, dada a lacuna que o *software Ansys* ainda tem, por este processo só poder ser realizado com objetos tridimensionais. Ou seja, verificou-se que, com as geometrias 2D não se podia ir por esta via. Assim, a solução e método utilizado por não se conseguir usar diretamente a geometria otimizada, passou por exportar as topologias e usar o *software Inventor*, para fazer uma “nova” microviga.

Uma outra situação que se concluiu ao longo do processo numérico foi que as microvigas num primeiro estudo não tiveram restrições associadas à fabricação, no entanto, verificou-se a impossibilidade de as produzir, dadas as espessuras obtidas. Como tal, houve a necessidade de fazer novos estudos com essa restrição, tendo se verificado uma impossibilidade de obter microvigas com menos de 20% da massa original, em ambas as análises estática e modal. Constatou-se assim que esta era a quantidade

máxima de material que o *software* conseguia remover. Isto porque o programa certamente entrou em conflito visto que não conseguiu simultaneamente manter a restrição de espessura e remover o material necessário.

Estas análises numéricas foram então realizadas com o intuito de construção de gráficos que evidenciassem em qual dos modos (*Static Structural* ou Modal) havia melhor comportamento de rigidez estática e dinâmica das microvigas otimizadas e as suas melhores formas. Estes gráficos presentes no Subcapítulo 4.1 e 4.2 referentes aos resultados numéricos sem e com restrição de espessura, respetivamente, permitiram chegar a algumas conclusões, que se verificaram em ambos os estudos.

Com base então nos gráficos elaborados, foi possível tecer duas reflexões no que concerne às análises estáticas e dinâmicas de microvigas, sob condições fronteira e de carregamento iguais às aplicadas no presente trabalho: (i) A primeira reflexão está relacionada com a rigidez estática. Ou seja, quando for necessário realizar um estudo estático e analisar microvigas, basta realizar a otimização topológica no modo *Static Structural*. A justificação para tal, reside no facto de ser neste modo em que se obtiveram melhores valores de rigidez estática e melhores relações de K/m. Ou seja, as formas das microvigas otimizadas nesse modo são as mais promissoras para um estudo estático; por outro lado, (ii) no estudo de rigidez dinâmica ambos as topologias obtidas pelo método estático e modal apresentaram resultados interessantes ao nível de rigidez dinâmica e relações de K/m. Portanto, leva a crer que quando for pertinente estudar e analisar a rigidez dinâmica das microvigas, talvez seja relevante realizar os dois estudos, ou seja, fazer uma avaliação com os dois métodos de otimização.

Para a produção das microvigas reticuladas, teve-se como objetivo apresentar microvigas treliçadas metálicas produzidas através da fabricação de modelos poliméricos por estereolitografia, seguidos da fundição por modelo perdido da liga de alumínio A356, isto porque a fundição metálica consegue garantir um maior controlo dimensional e microestrutural.

Para tal, foram analisadas para produção, as microvigas otimizadas com o parâmetro de restrição de fabrico obtidas pelo método estático e modal com a melhor relação de K/m. De notar que, não se ponderou fabricar a microviga com melhor relação de K/m otimizada pelo método modal com uma massa concentrada, uma vez que, não se iria conseguir realizar futuros ensaios mecânicos.

Assim, com base na Metodologia de fabricação realizada foi possível obter as microvigas reticuladas metálicas presentes no Subcapítulo 4.3, referentes aos Resultados da fabricação. Através destes resultados foi possível concluir de entre as três técnicas adotadas, a técnica de construção do cacho com ramificação única onde a liga é vazada diretamente para uma só microviga, ou a técnica do cacho com a construção dos canais auxiliares, foram as que obtiveram melhores resultados dos detalhes nas zonas

reticuladas, embora ainda assim apresentassem falhas de material. Verificou-se assim que a tecnologia de fabrico ainda não permite fabricar facilmente este tipo de estruturas, dadas as imperfeições e falhas de material nas microvigas produzidas. Ou seja, não é viável para componentes com uma espessura tão pequena. Possivelmente uma das situações que pode ter levado ao insucesso da fabricação pode ser devido à acumulação de vestígios que não foram completamente eliminados nos canais e, portanto, a espessura das zonas reticuladas ao invés de ter uma espessura mínima requerida de 0,3 mm ter um valor inferior gerando grande dificuldade de fabricar estas peças metálicas.

## **5.2. TRABALHOS FUTUROS**

Através dos resultados obtidos das microvigas fundidas, não foi possível prosseguir com a realização de ensaios mecânicos estáticos/dinâmicos para validação experimental das topologias das microvigas fabricadas.

Assim, dada a impossibilidade de aplicação ainda da técnica utilizada, por não permitir este tipo de estruturas com as espessuras requeridas, um possível trabalho futuro, poderia passar por aumentar um pouco a restrição de espessura, por exemplo, 1 mm, refazendo toda a metodologia usada no presente trabalho, isto é, refazer as otimizações topológicas das microvigas, e produzir novas microvigas por forma a efetivamente tentar realizar o processo de validação experimental.

No entanto, isto seria no caso de não haver problema em aumentar a restrição de espessura. Mas, caso se pretendesse manter as estruturas com as pequenas espessuras como a que foi utilizada, os estudos passariam por melhorar alguns aspetos da técnica de fabrico utilizada. Ou seja, tentar encontrar soluções para o problema discutido no corpo do trabalho referente à possível acumulação de vestígios de resina que não foram completamente eliminados nos canais. Ou seja, os trabalhos futuros passariam por focar mais os estudos na queima das resinas, de forma que esta seja mais desenvolvida e tentar melhorar os ciclos térmicos para a sua eliminação, de maneira a não comprometer a espessura previamente definida nos estudos numéricos.

Deste modo, sugere-se que no futuro com a informação adquirida para este tipo de estruturas analisadas neste trabalho, se desenvolvam os métodos acima descritos, pois só assim será certamente possível atingir o objetivo da realização da caracterização através de ensaios mecânicos para validar as topologias e microestrutura obtidas numericamente.

## **ANEXOS**

Nos anexos seguintes encontram-se apresentados todos os resultados dos estudos realizados, incluindo as topologias obtidas em todas as rotinas numéricas efetuadas e, ainda, os gráficos construídos a partir dessas topologias.

## ANEXO A

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método estático, com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

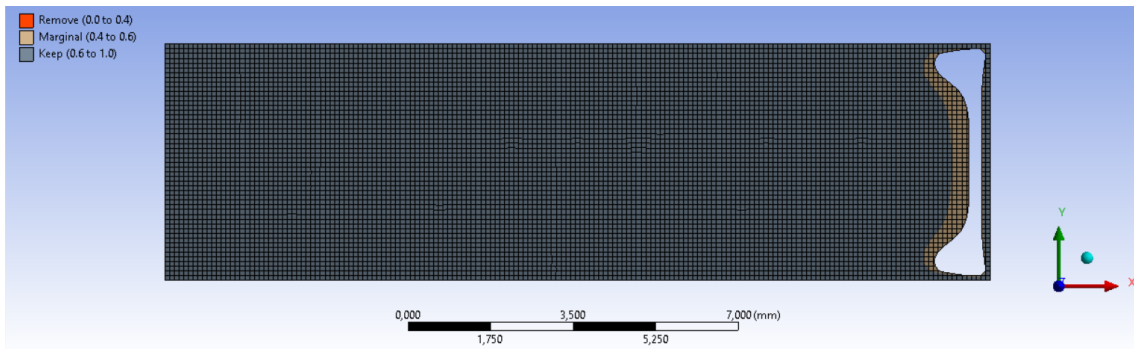


Figura A.1 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 95%.

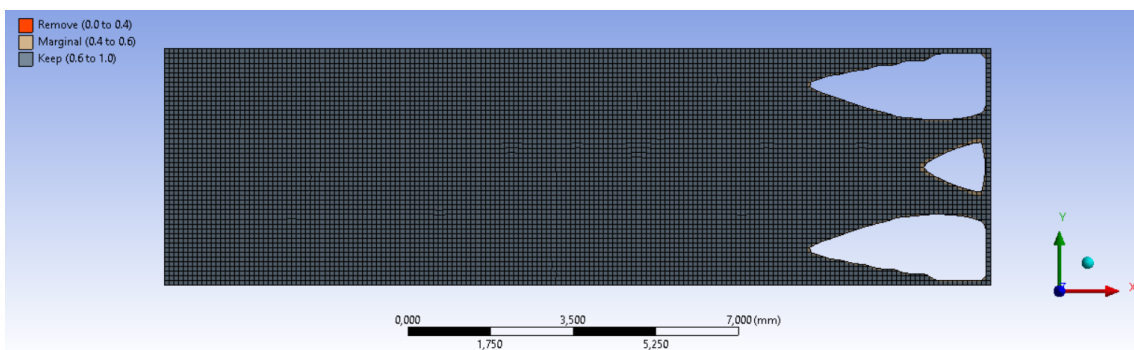


Figura A.2 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 90%.

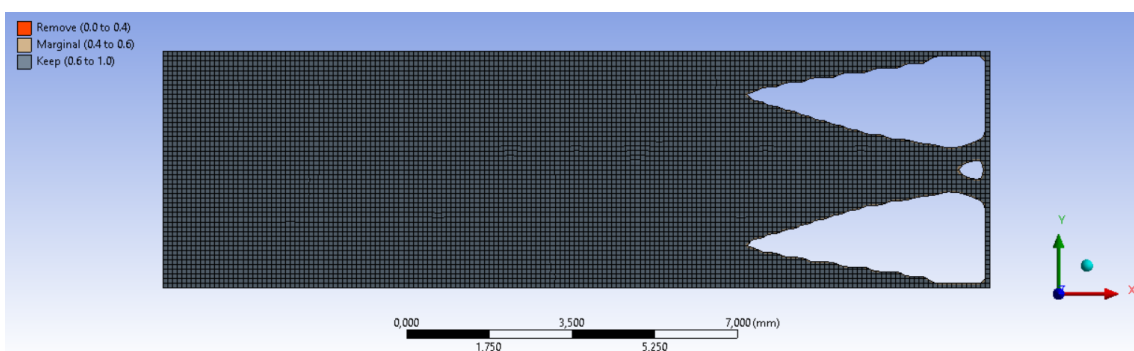


Figura A.3 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 85%.

## Otimização topológica de microvigas reticuladas fundidas

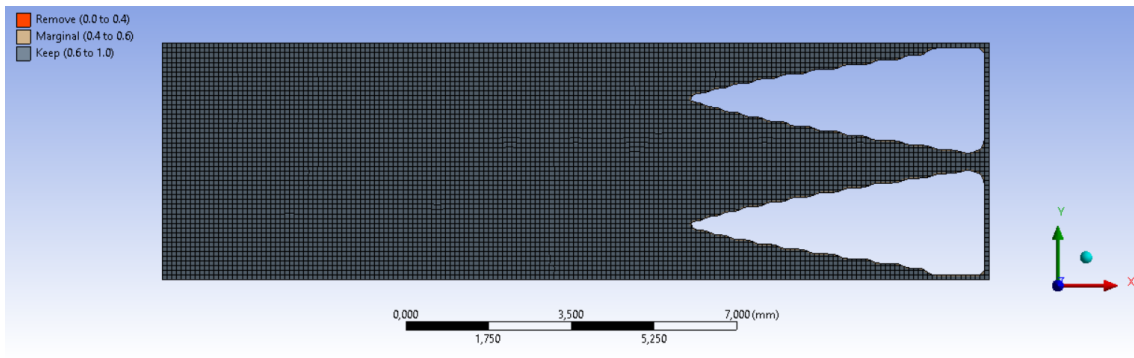


Figura A.4 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 80%.

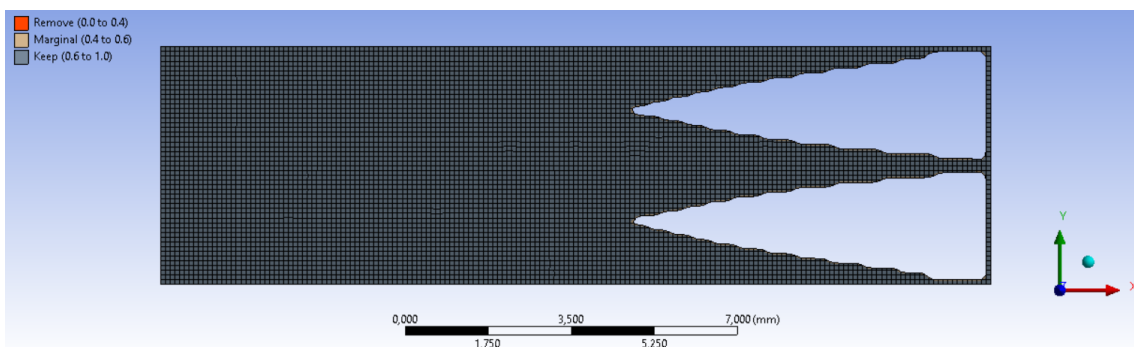


Figura A.5 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 75%.

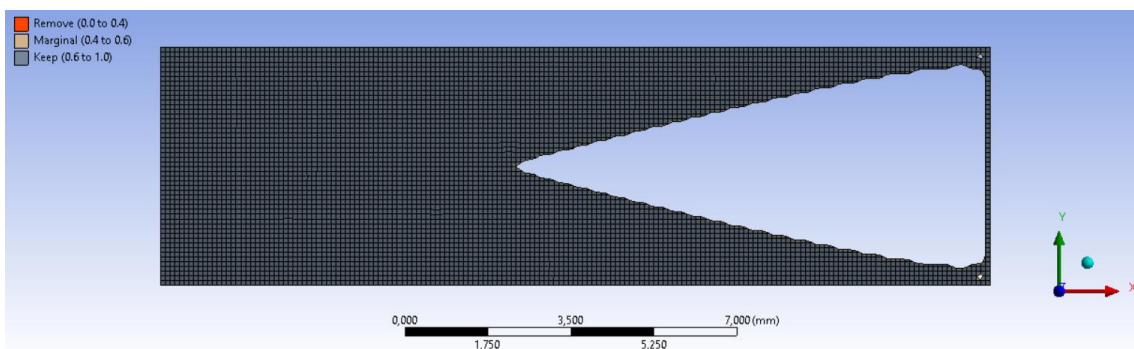


Figura A.6 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 70%.

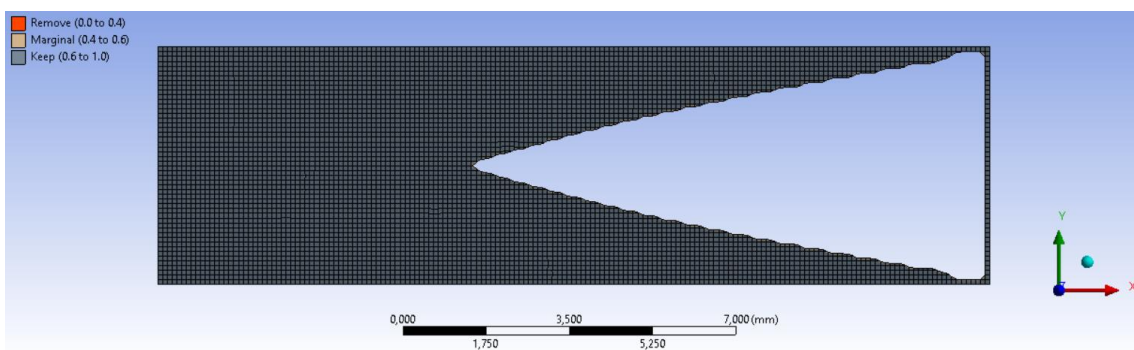


Figura A.7 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 65%.



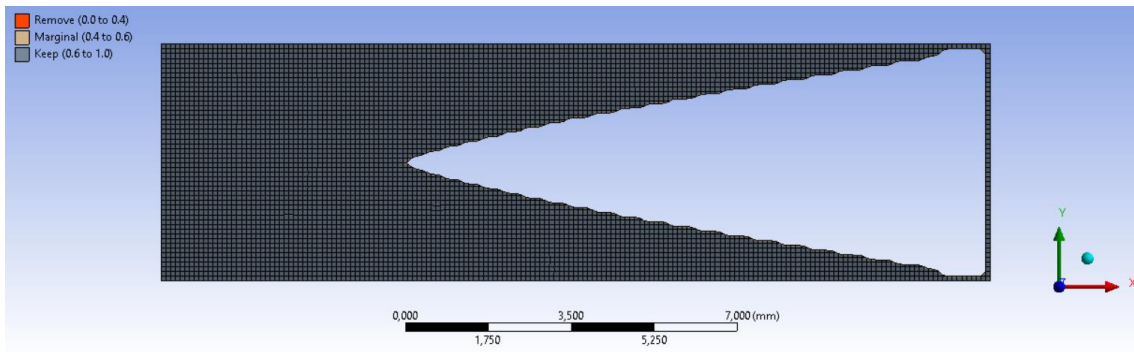


Figura A.8 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 60%.

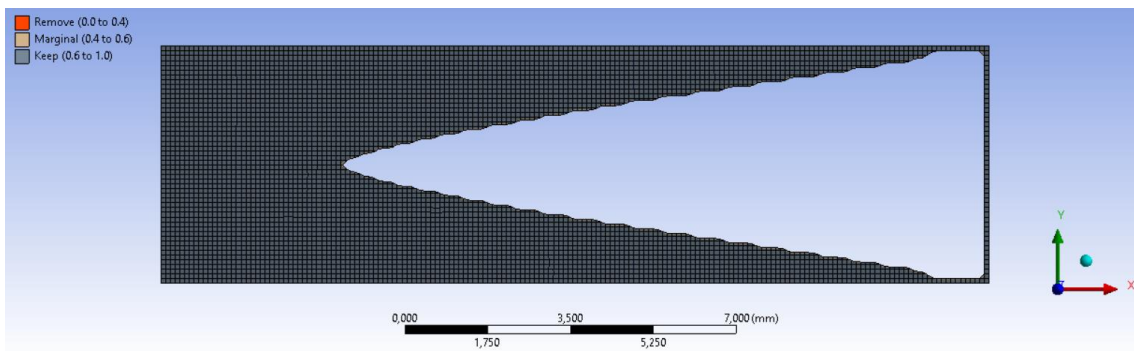


Figura A.9 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 55%.

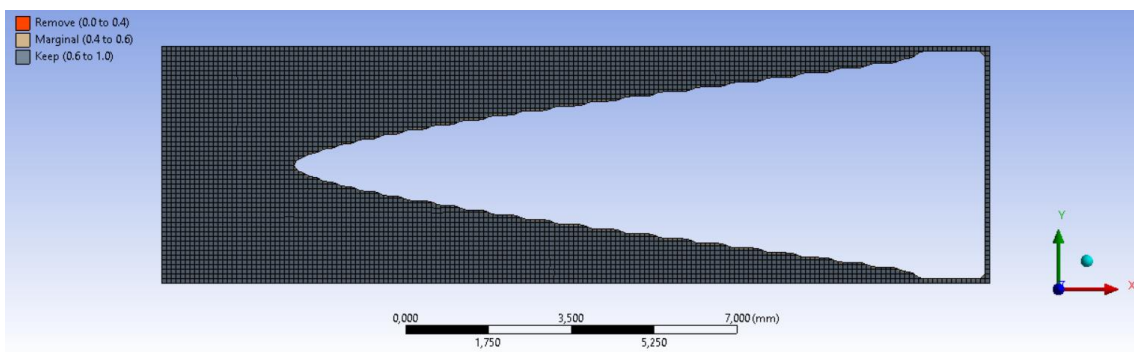


Figura A.10 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 50%.

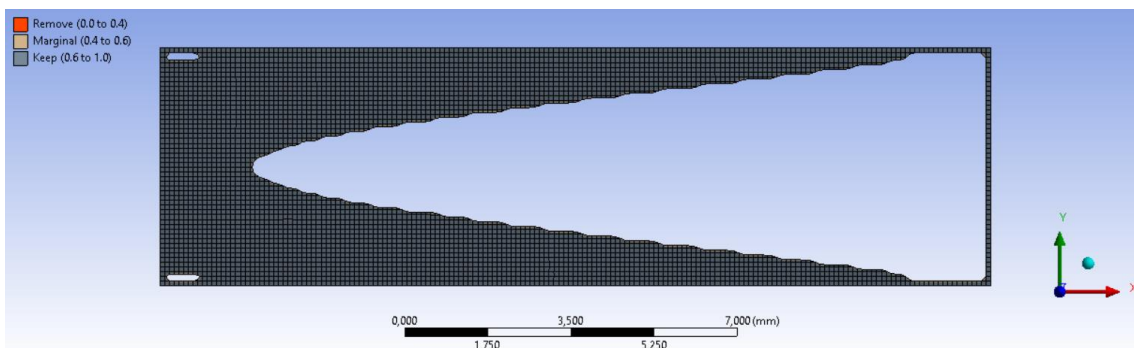


Figura A.11 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 45%.

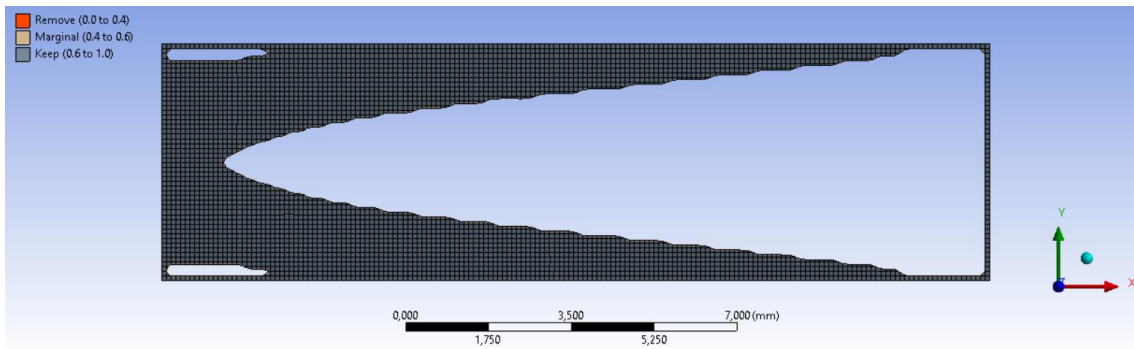


Figura A.12 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 40%.

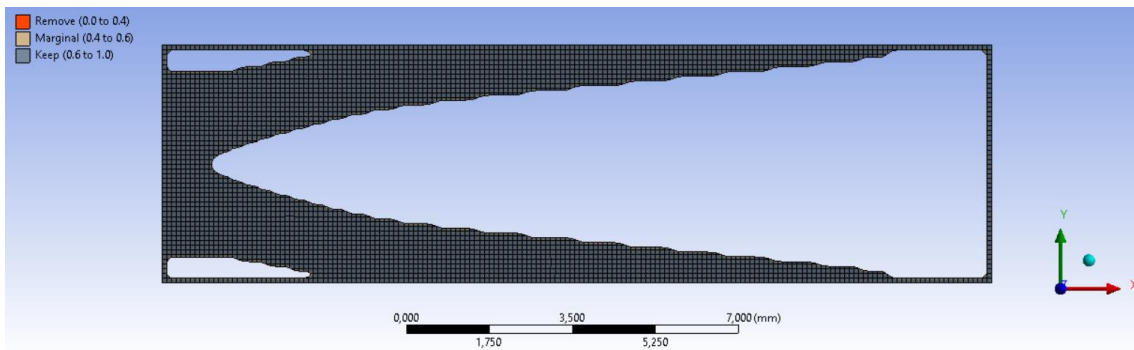


Figura A.13 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 35%.

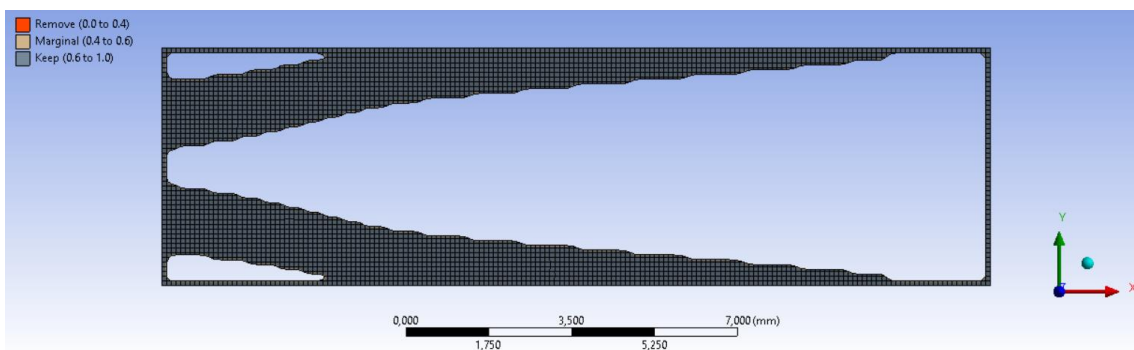


Figura A.14 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 30%.

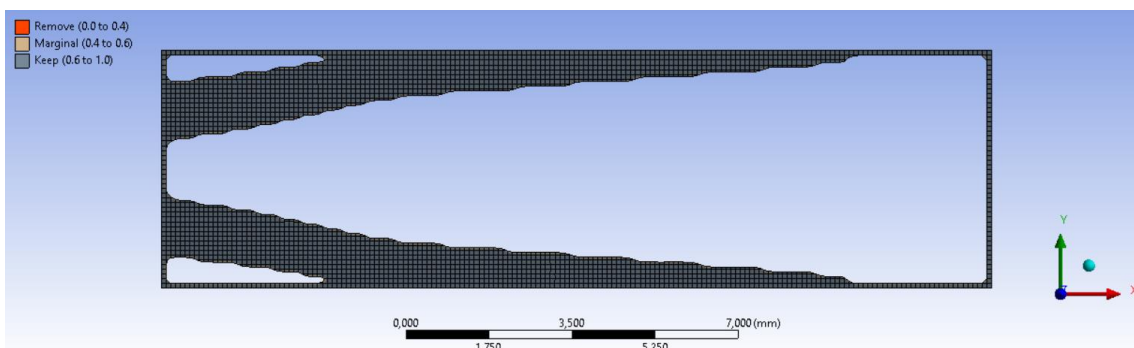


Figura A.15 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 25%.

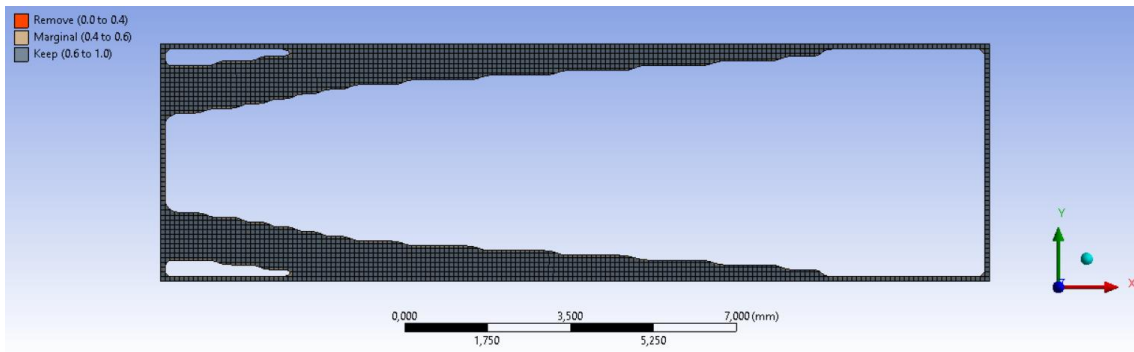


Figura A.16 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 20%.

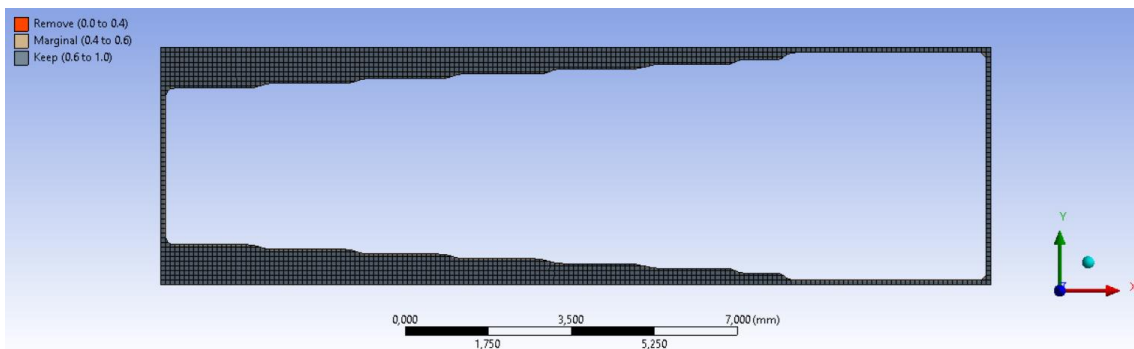


Figura A.17 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 15%.

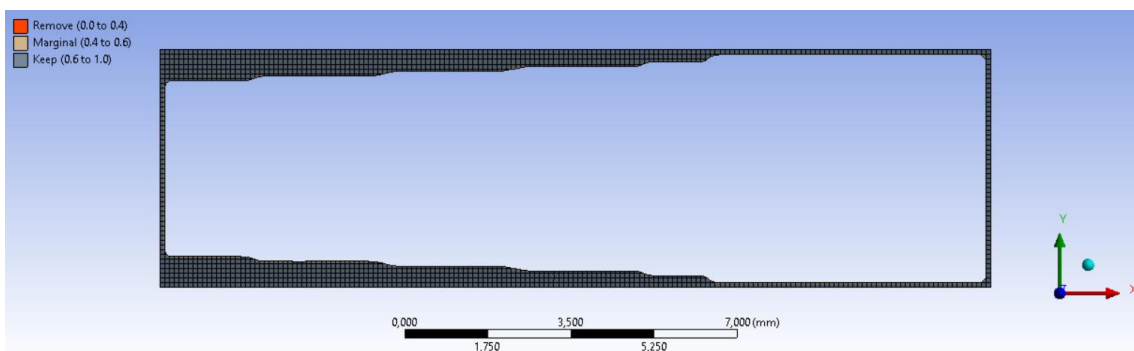


Figura A.18 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 10%.

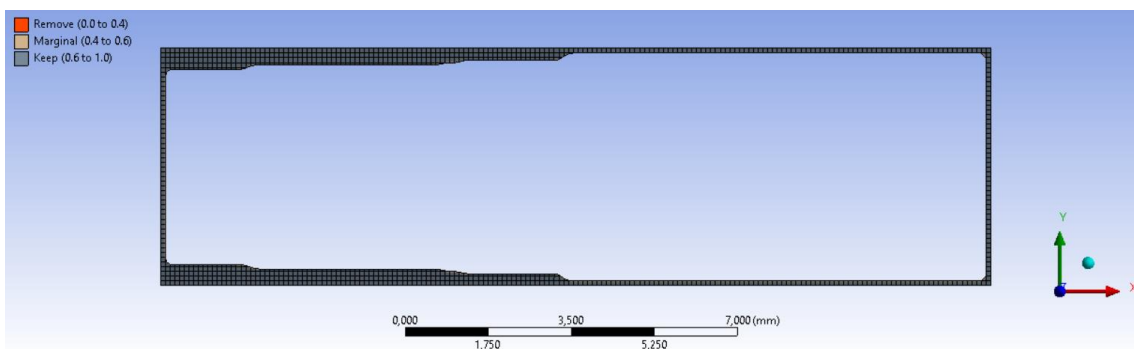


Figura A.19 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 5%.

## ANEXO B

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez estática da microviga com 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

No que concerne ao primeiro gráfico representado, este é então relativo à variação dos valores de rigidez estática nas 20 microvigas reticuladas otimizadas com sucessivas diminuições de massa.

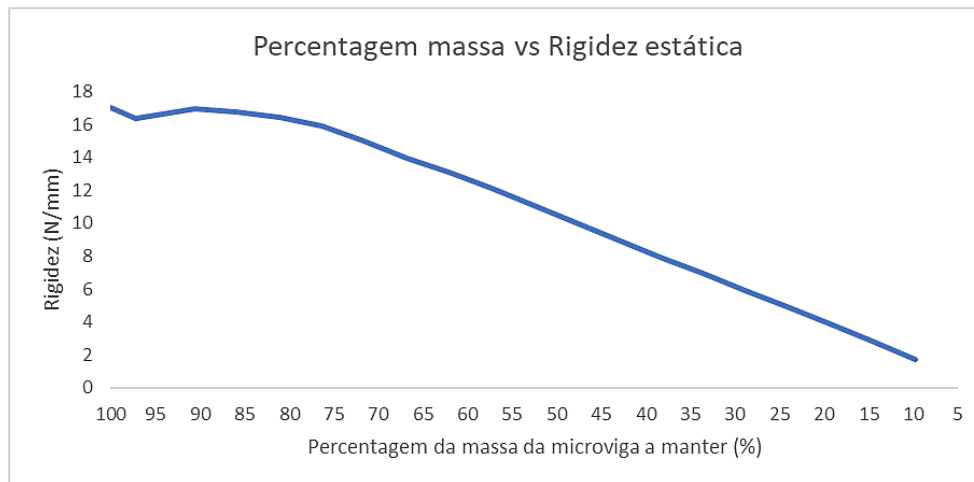


Figura B.1- Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

Este segundo gráfico apresentado é relativo então à relação entre a rigidez e a massa das microvigas, de forma a detetar a existência de pontos ótimos onde se consegue ter o compromisso entre rigidez e massa e, conseguir assim obter bons resultados de rigidez estática com a menor massa possível.

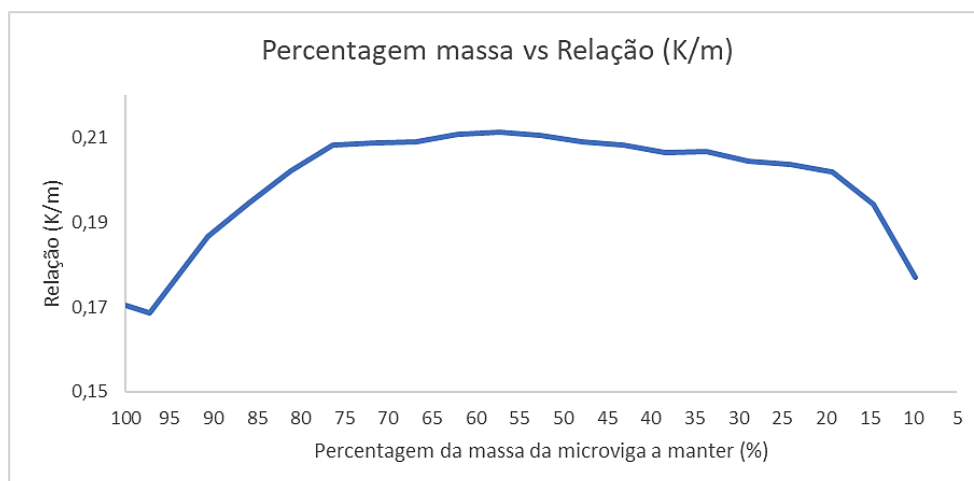


Figura B.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura, no estado plano de tensão.

## ANEXO C

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método estático, com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

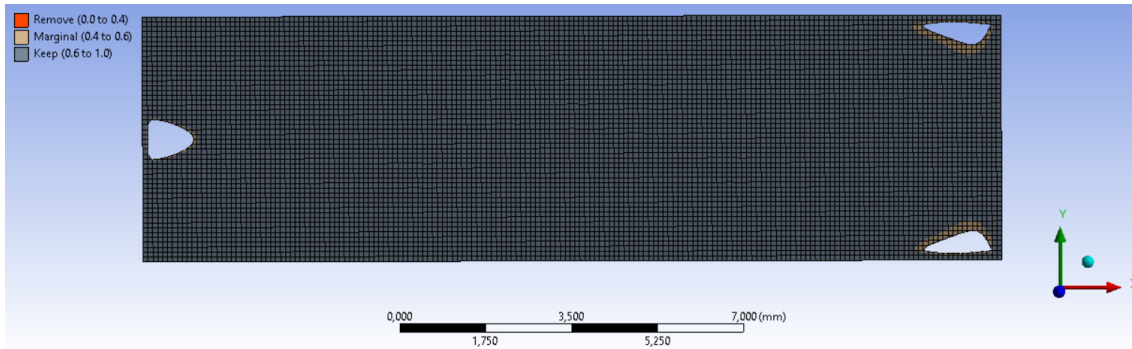


Figura C.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 95%.

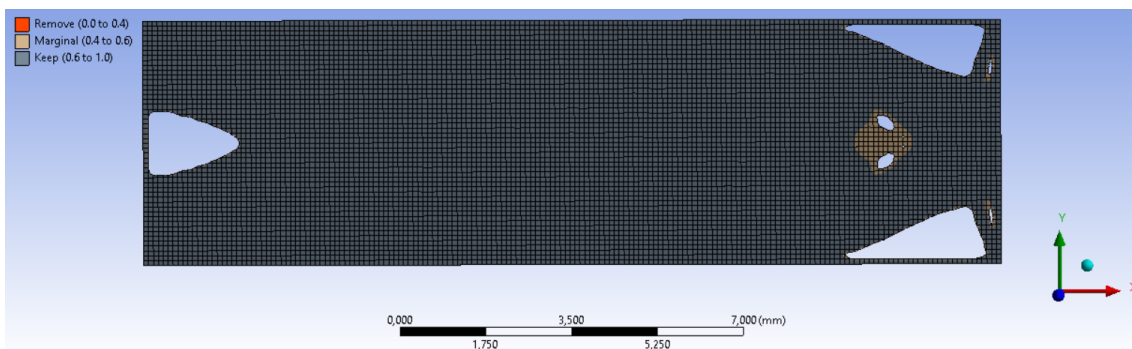


Figura C.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 90%.

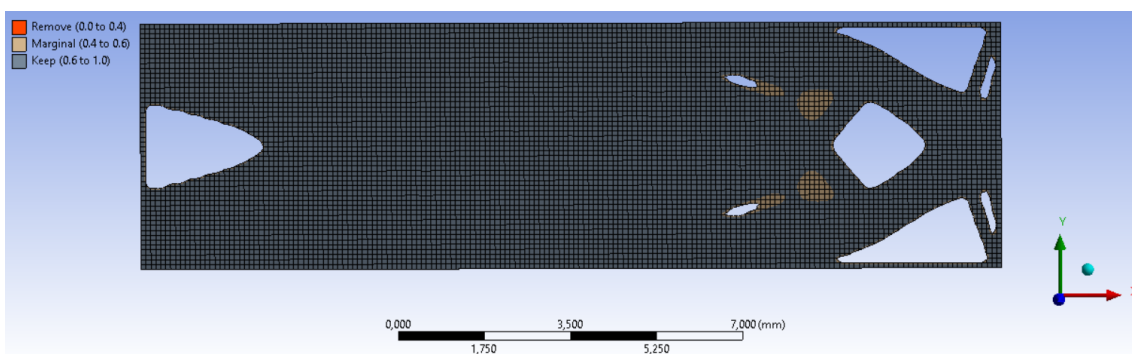


Figura C.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 85%.

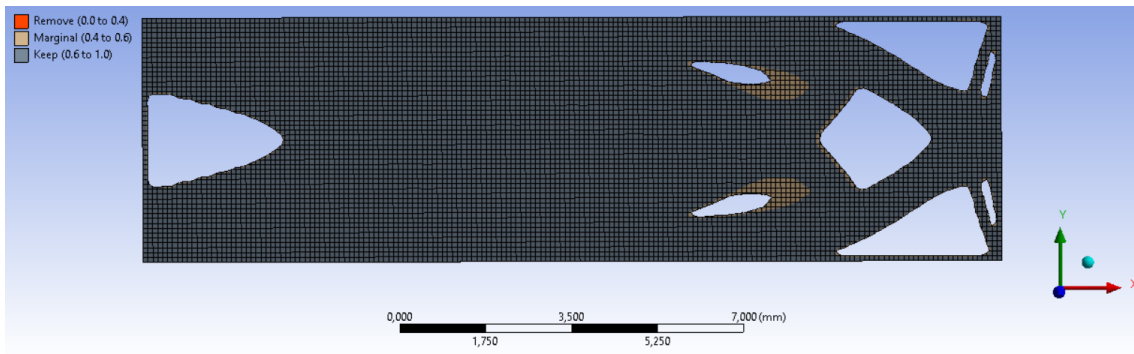


Figura C.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 80%.

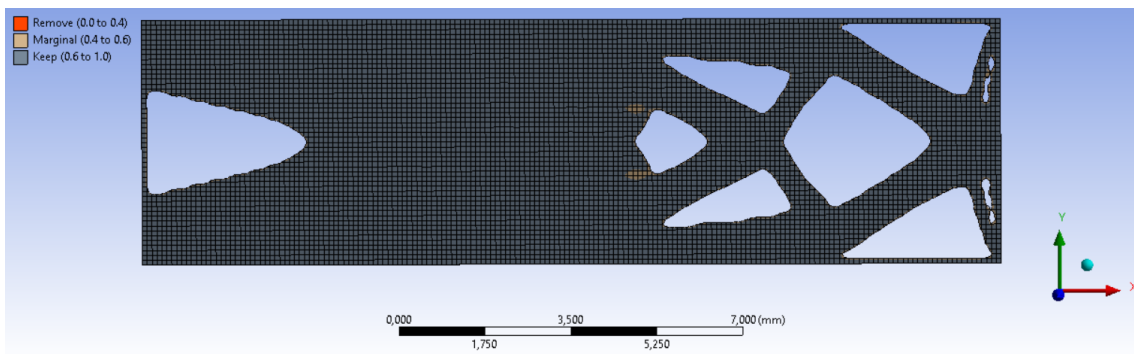


Figura C.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 75%.

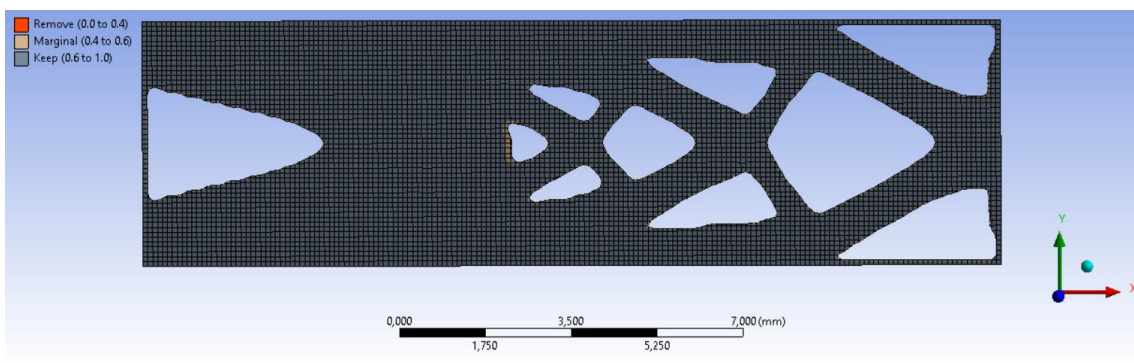


Figura C.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 70%.

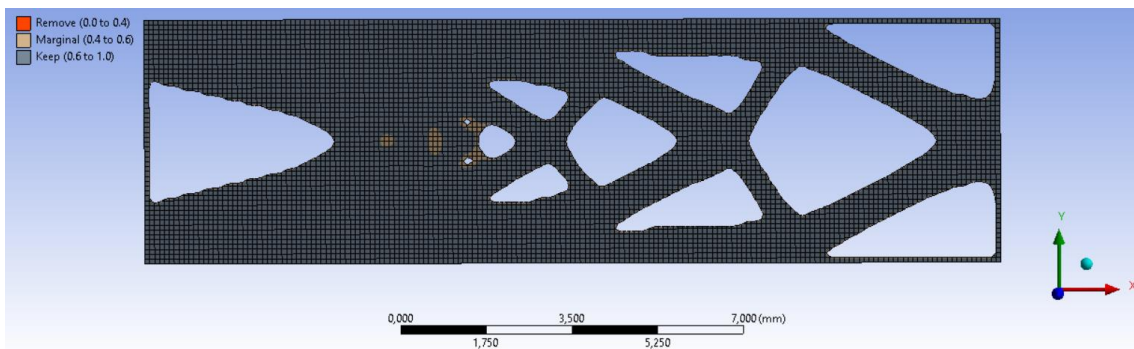


Figura C.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 65%.

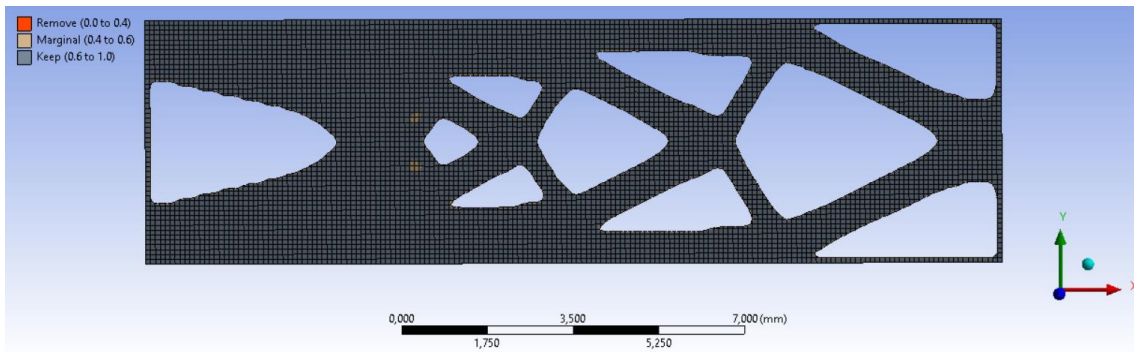


Figura C.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 60%.

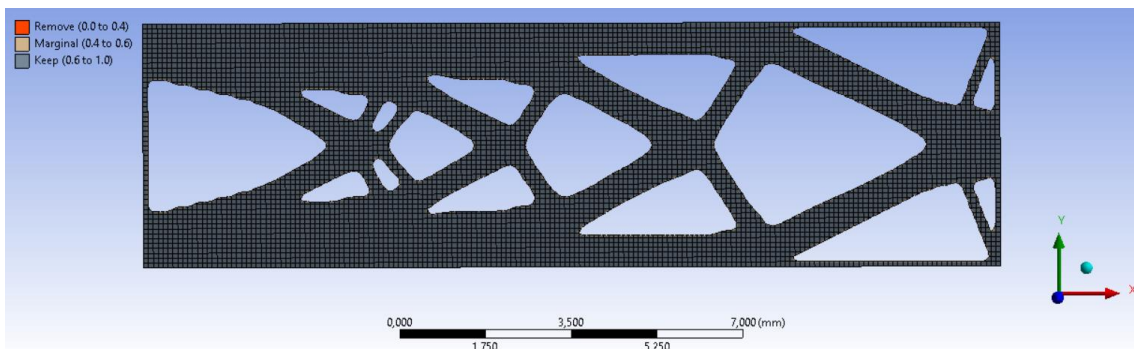


Figura C.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 55%.

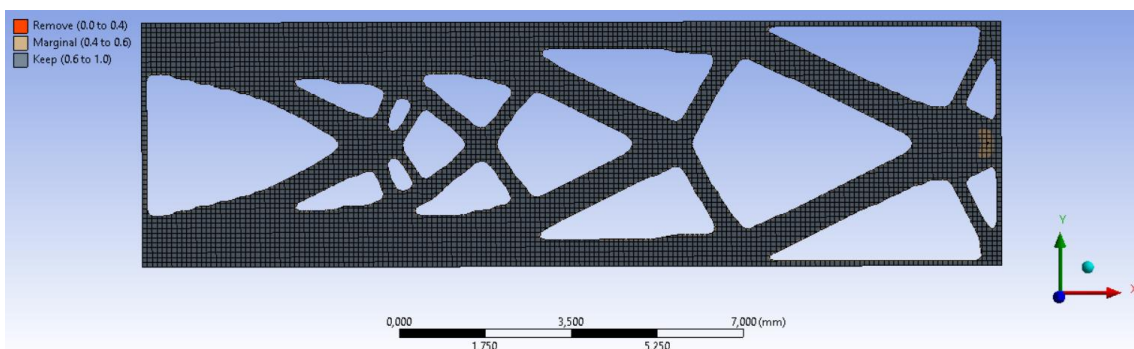


Figura C.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 50%.

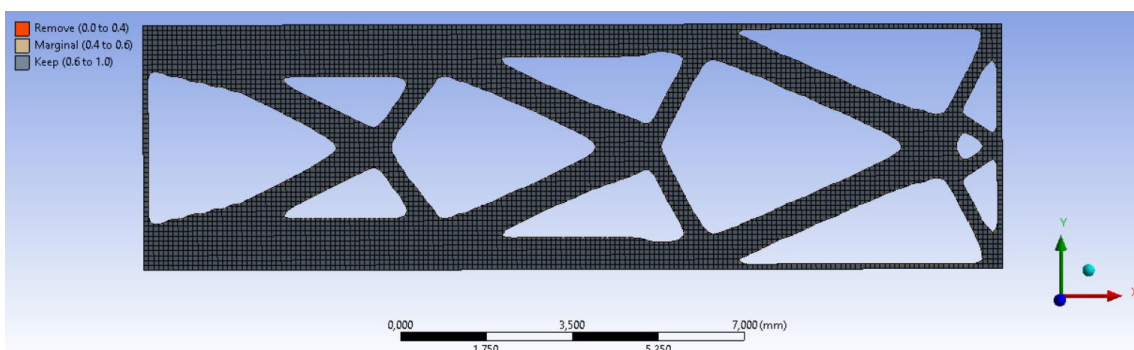


Figura C.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 45%.

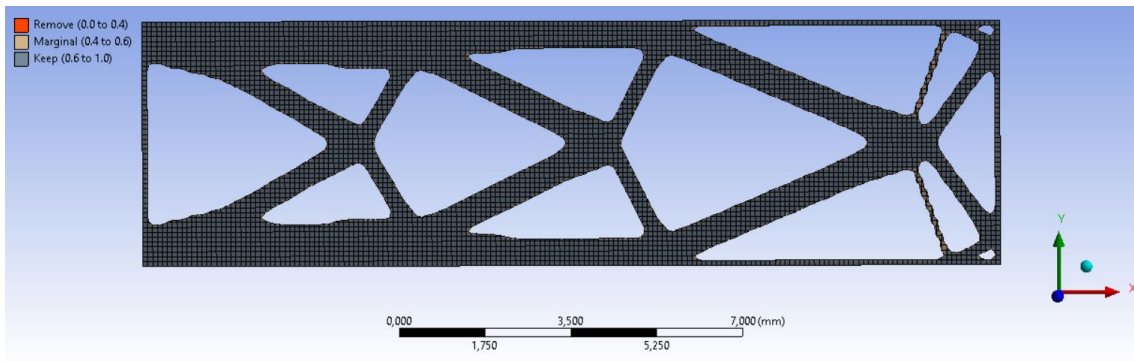


Figura C.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 40%.

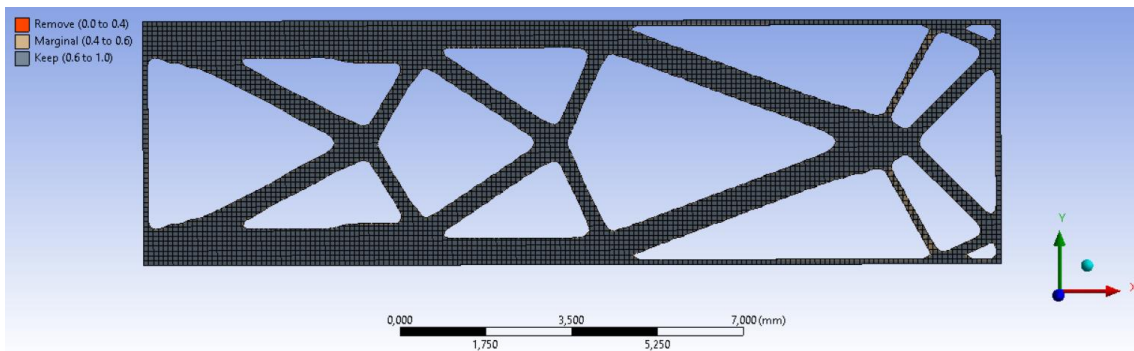


Figura C.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 35%.

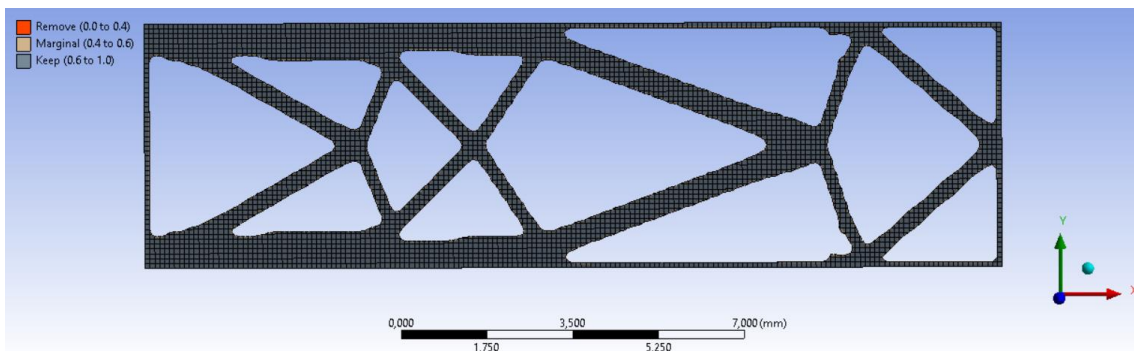


Figura C.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 30%.

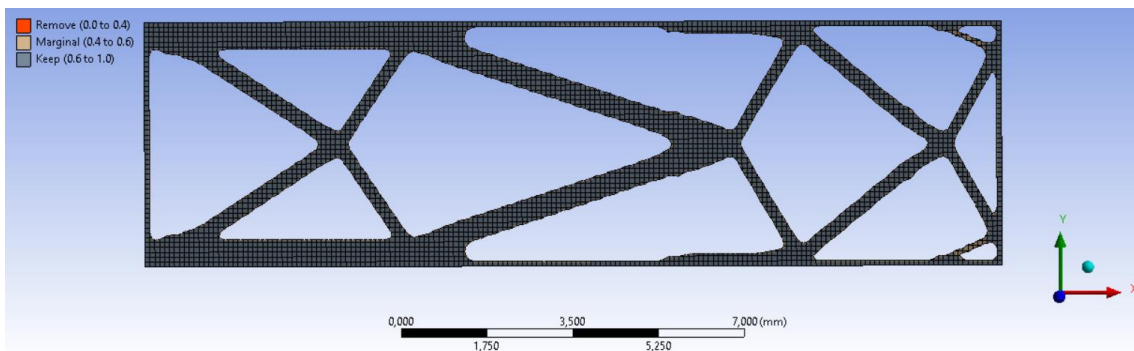


Figura C.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 25%.



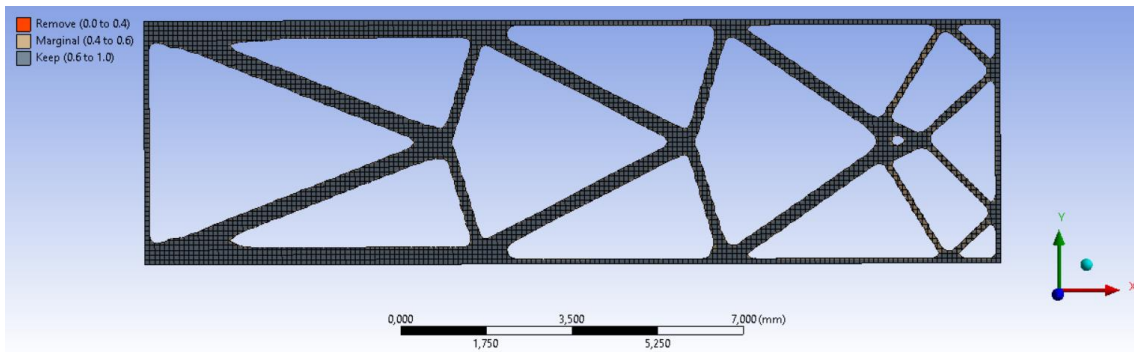


Figura C.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 20%.

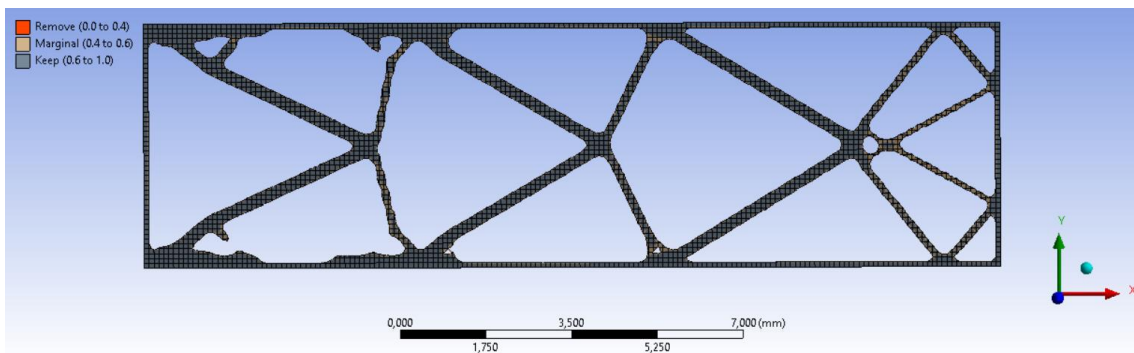


Figura C.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 15%.

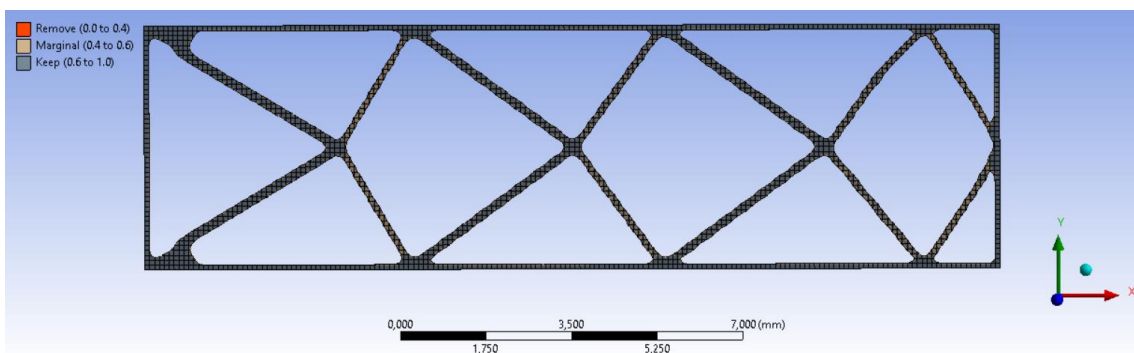


Figura C.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 10%.

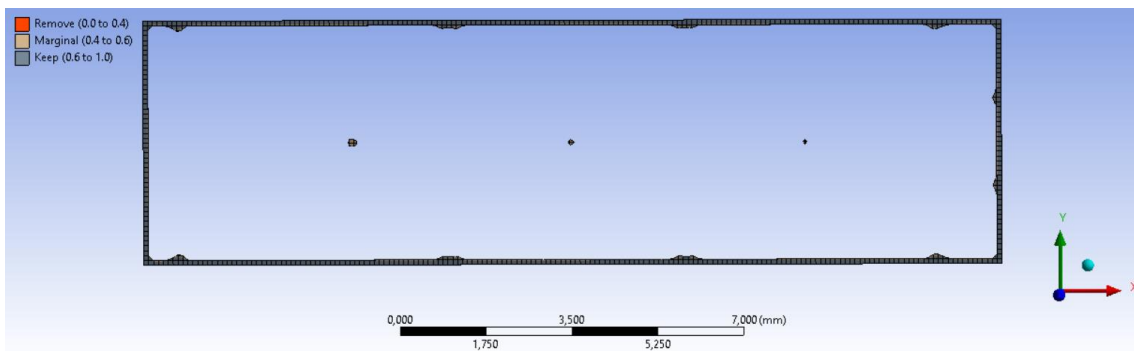


Figura C.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural* – iteração dos 5%.

## ANEXO D

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez estática da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

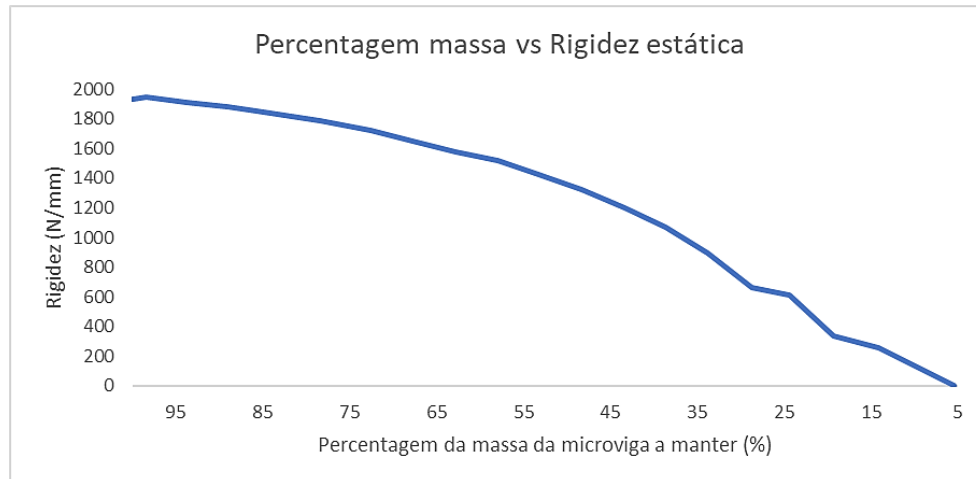


Figura D.1 - Gráfico da porcentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

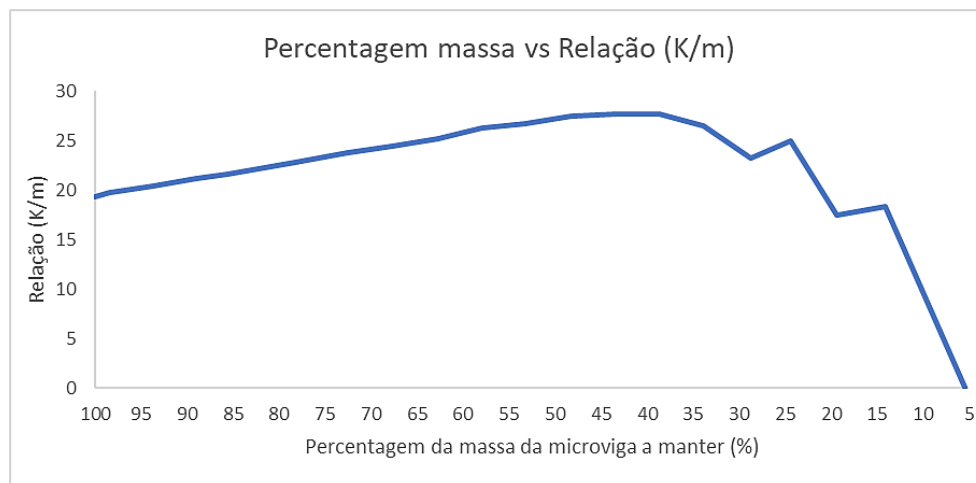


Figura D.2- Gráfico da porcentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação.

## ANEXO E

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método modal, com 1 mm de espessura.

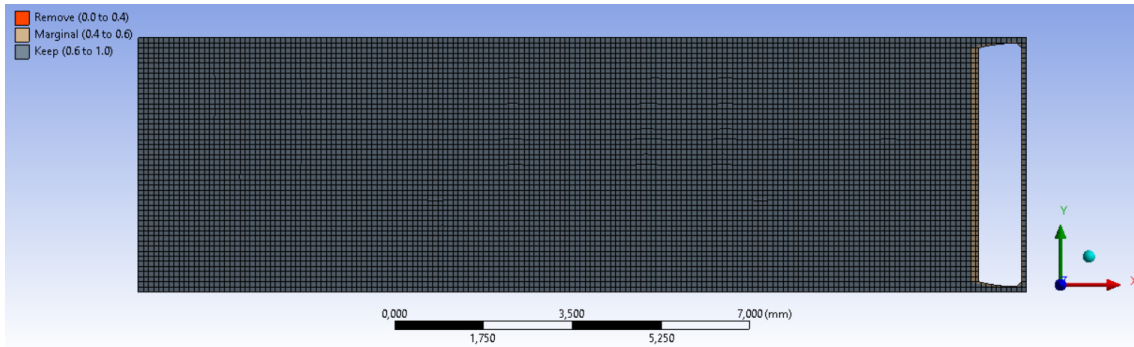


Figura E.1 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 95%.

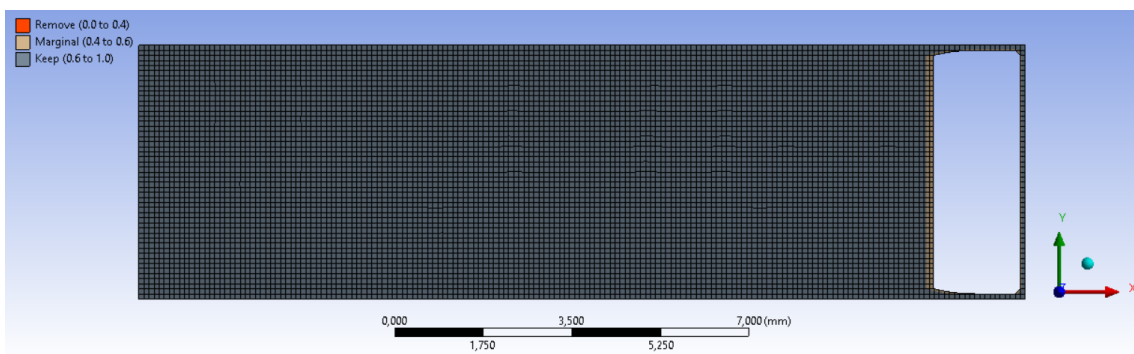


Figura E.2 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 90%.

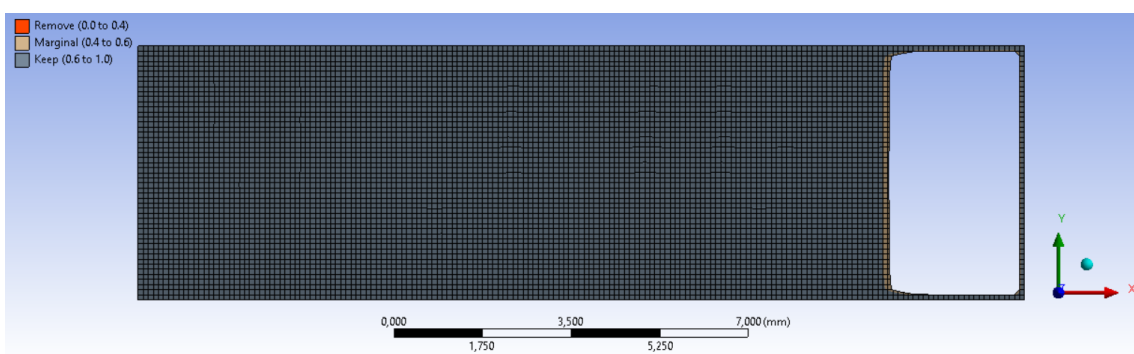


Figura E.3 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 85%.

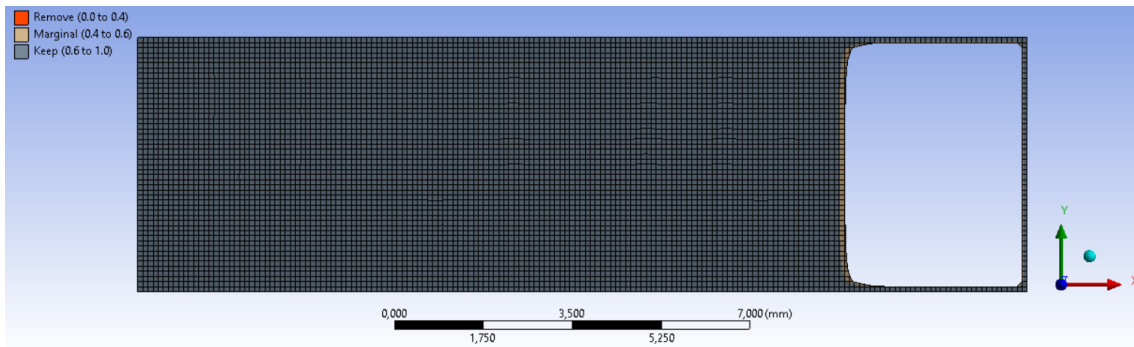


Figura E.4 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 80%.

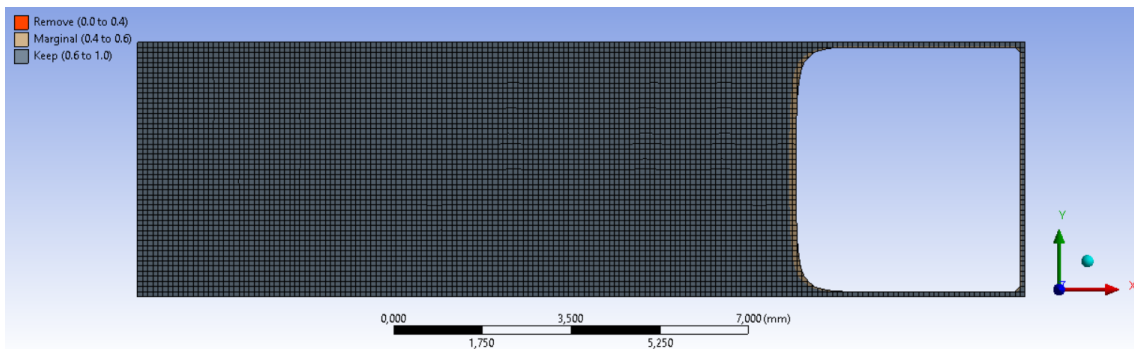


Figura E.5 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 75%.

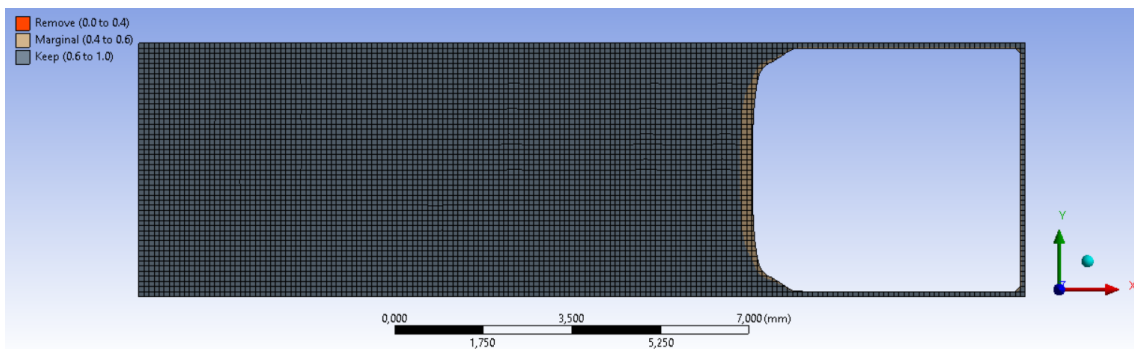


Figura E.6 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 70%.

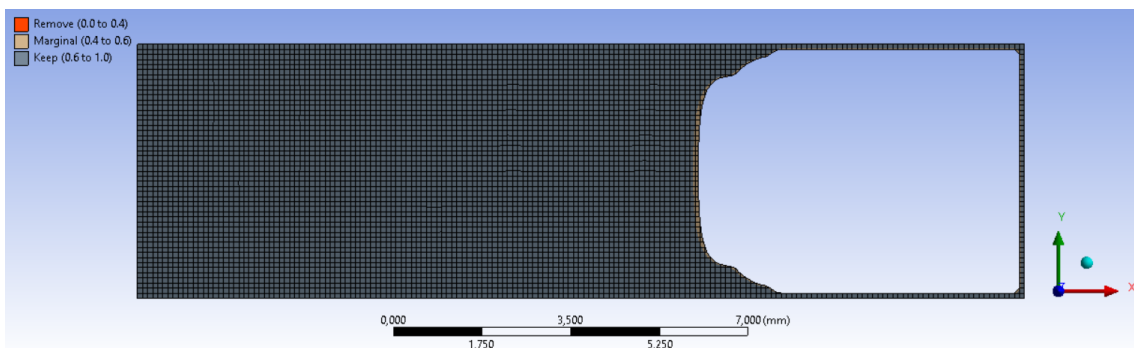


Figura E.7 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 65%.

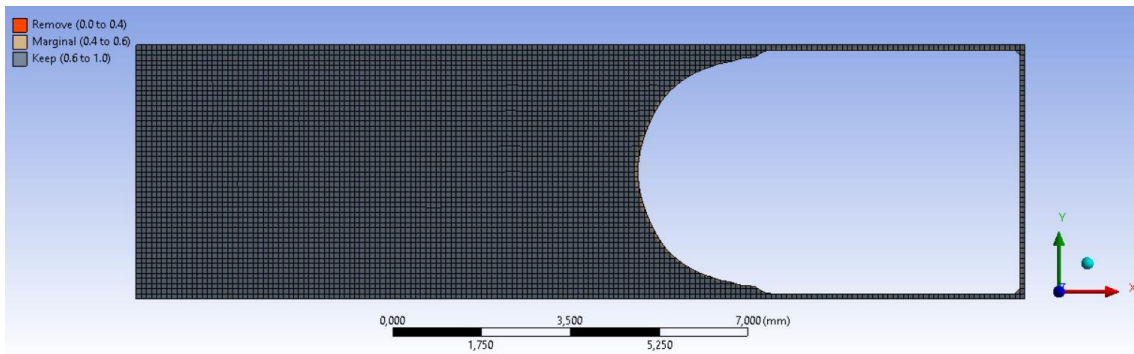


Figura E.8 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 60%.

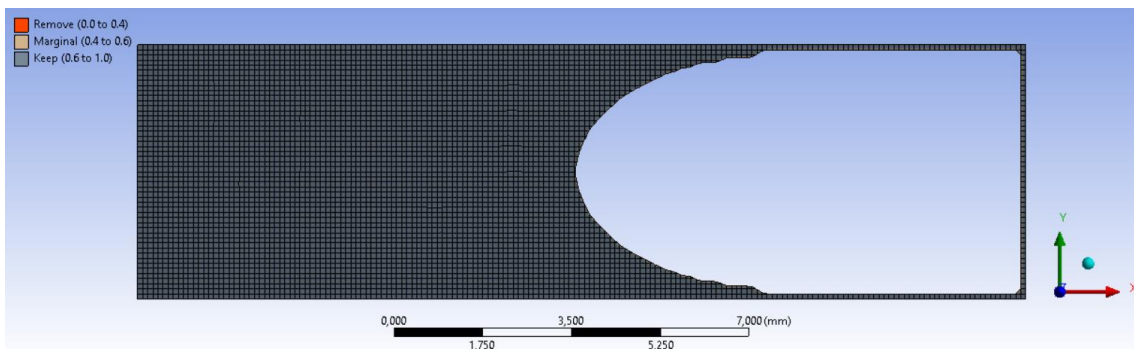


Figura E.9 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 55%.

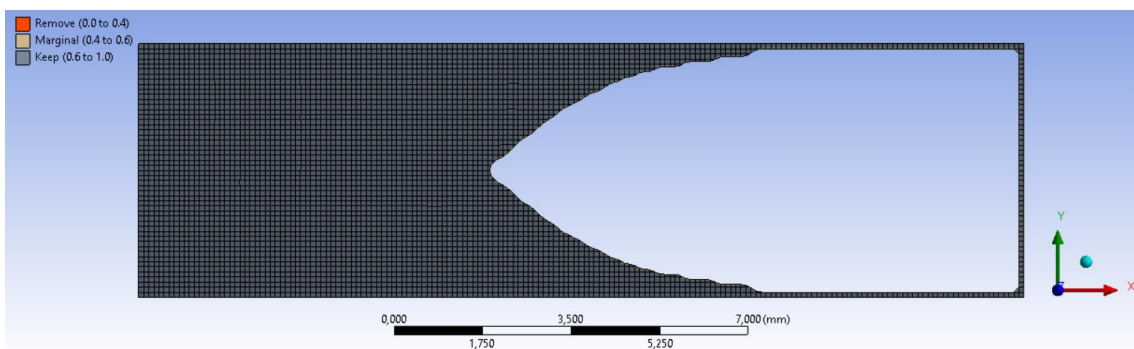


Figura E.10 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 50%.

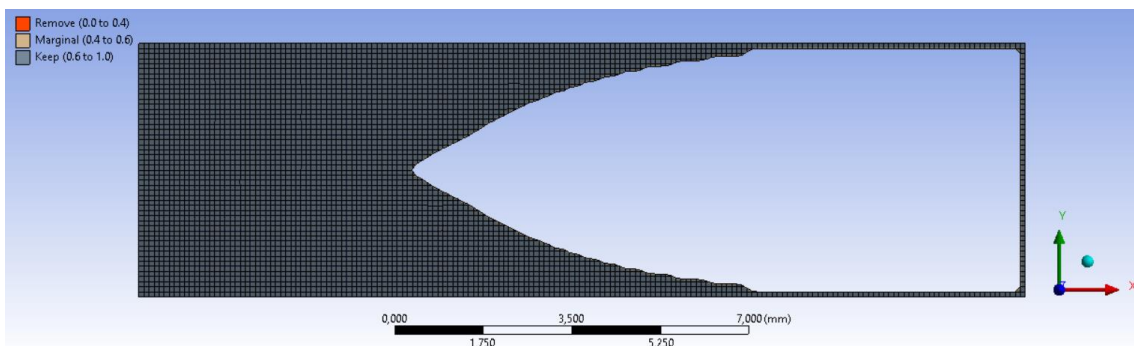


Figura E.11 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 45%.

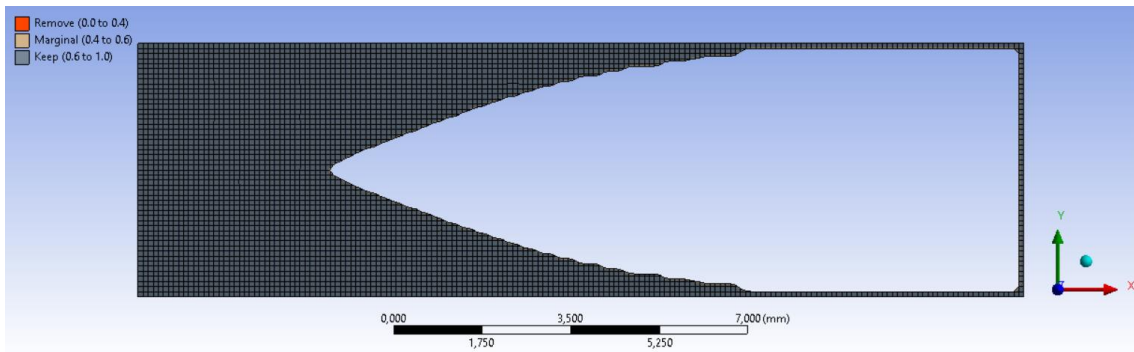


Figura E. 12 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 40%.

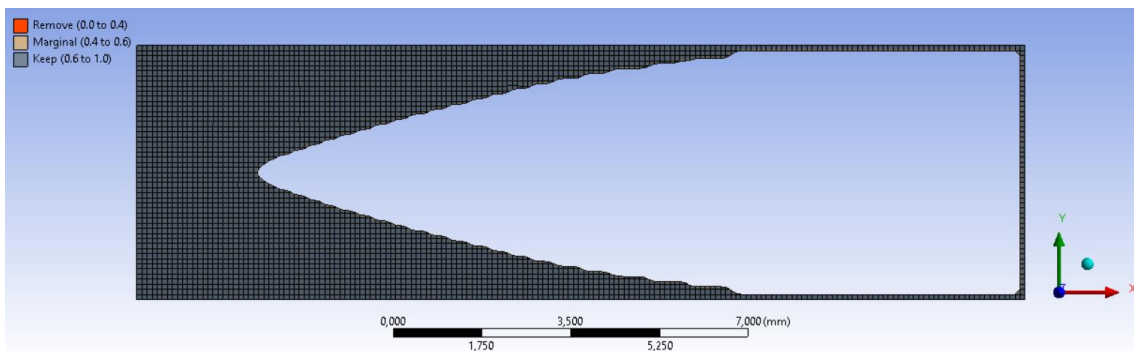


Figura E.13 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 35%.

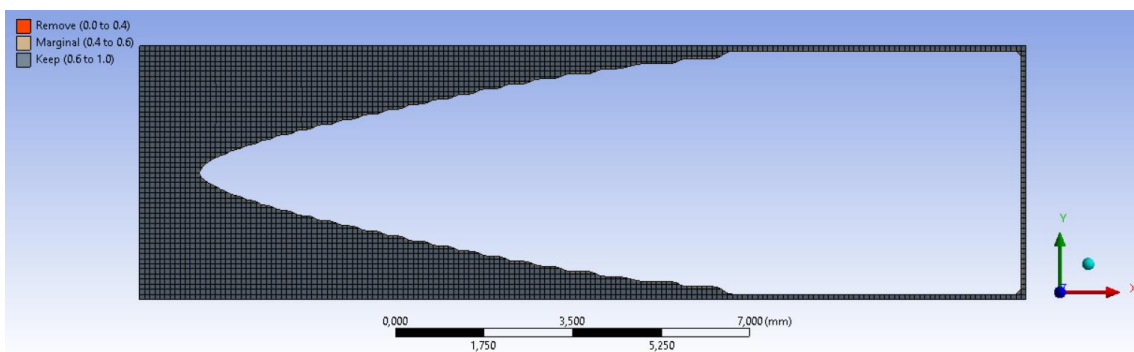


Figura E.14 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 30%.

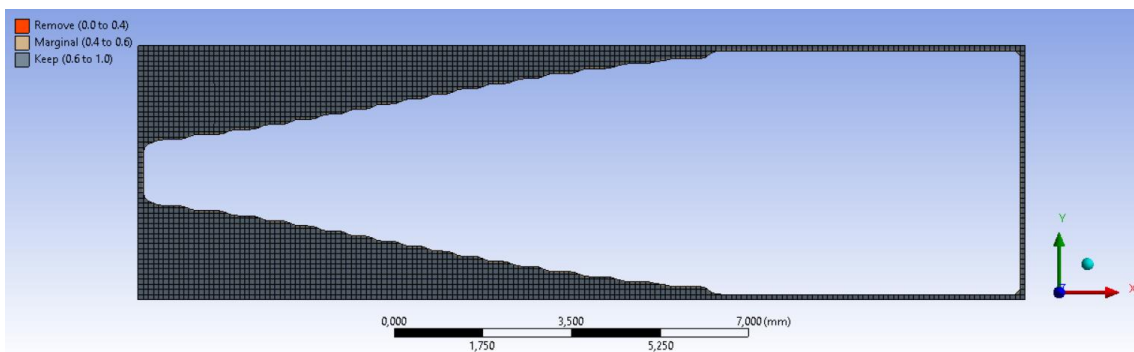


Figura E.15 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 25%.

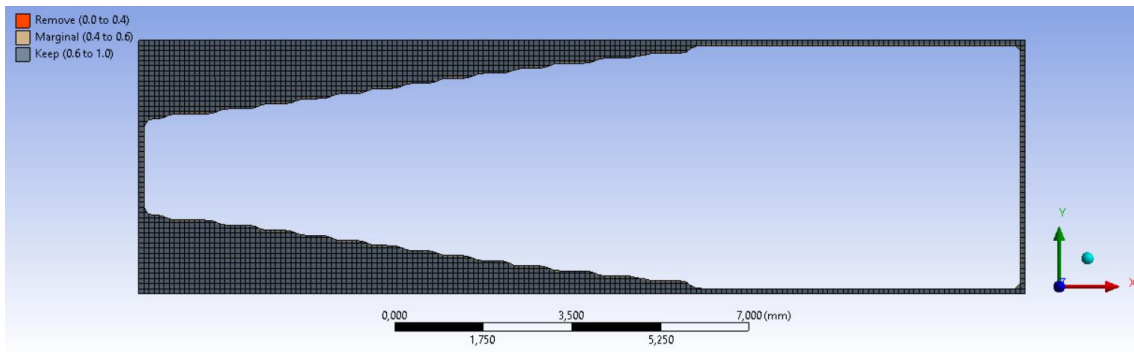


Figura E.16 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 20%.

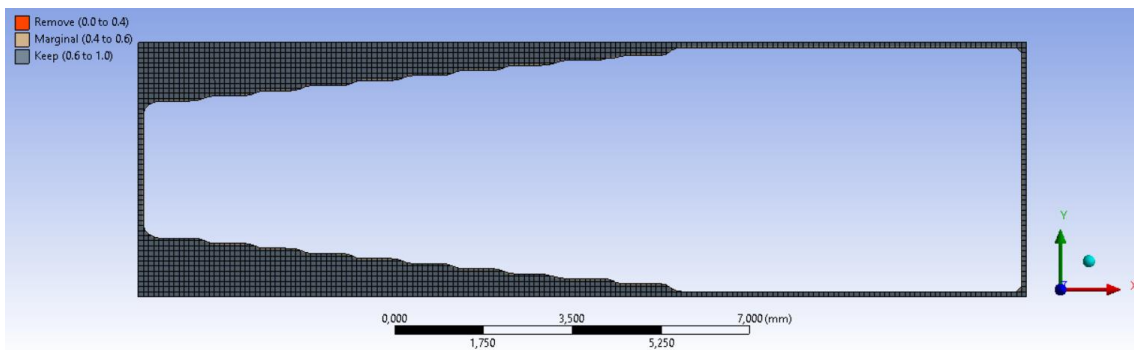


Figura E.17 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 15%.

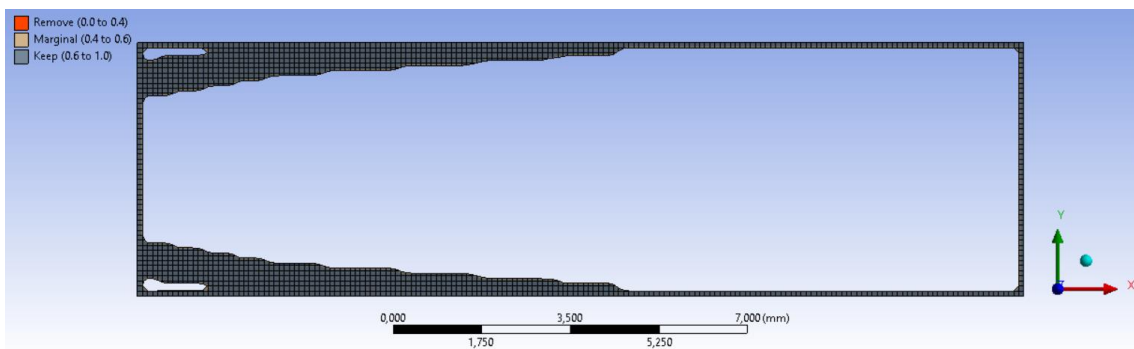


Figura E.18 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 10%.

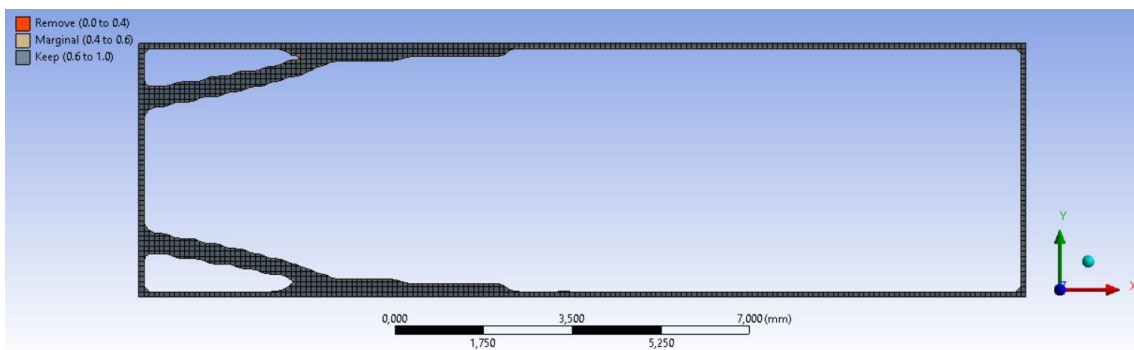


Figura E.19 - Topologia da microviga de 1 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 5%.

## ANEXO F

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez dinâmica da microviga com 1 mm de espessura.

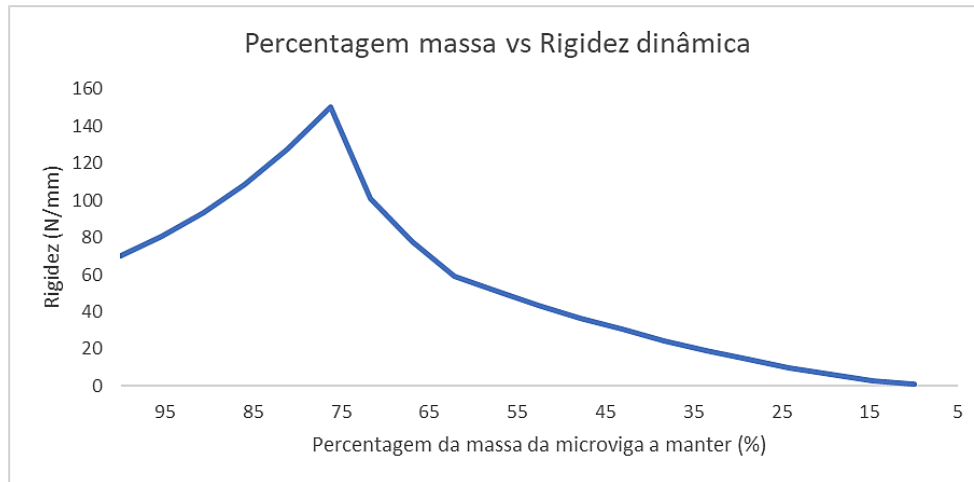


Figura F.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 1 mm de espessura.

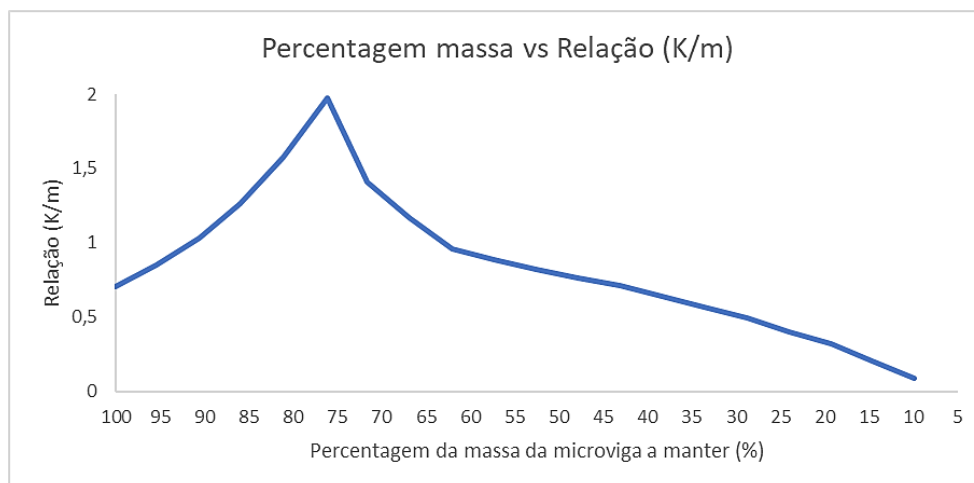


Figura F.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 1 mm de espessura.



## ANEXO G

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método modal, com 5 mm de espessura.

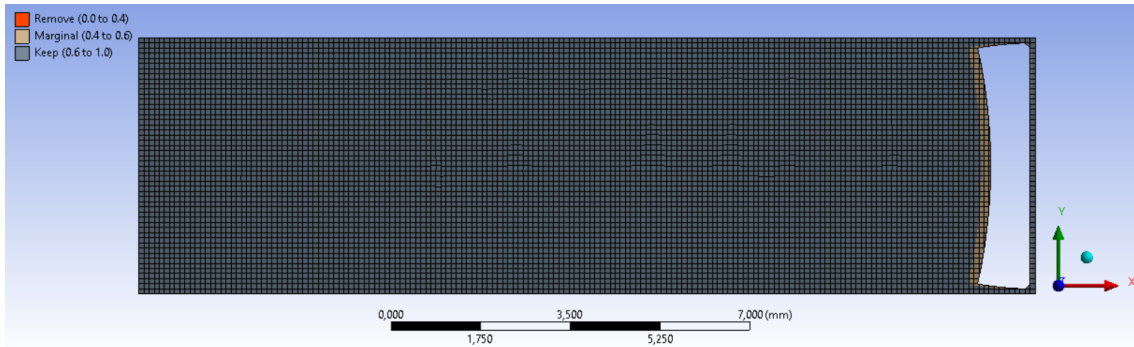


Figura G.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 95%.

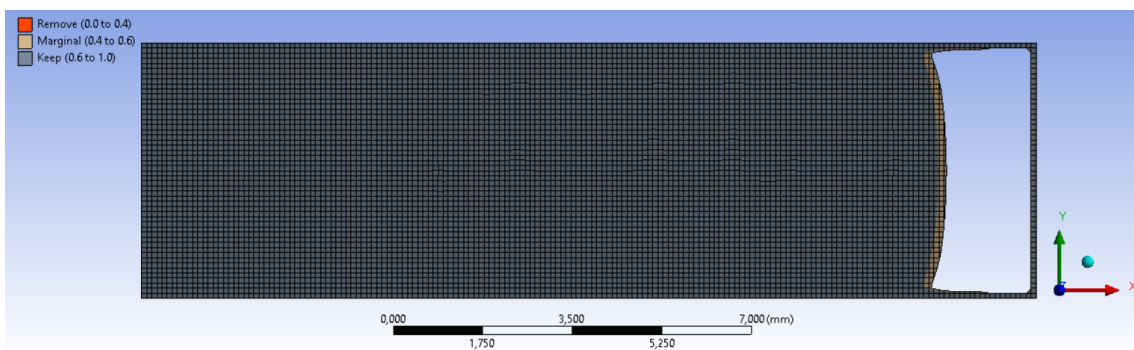


Figura G.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 90%.

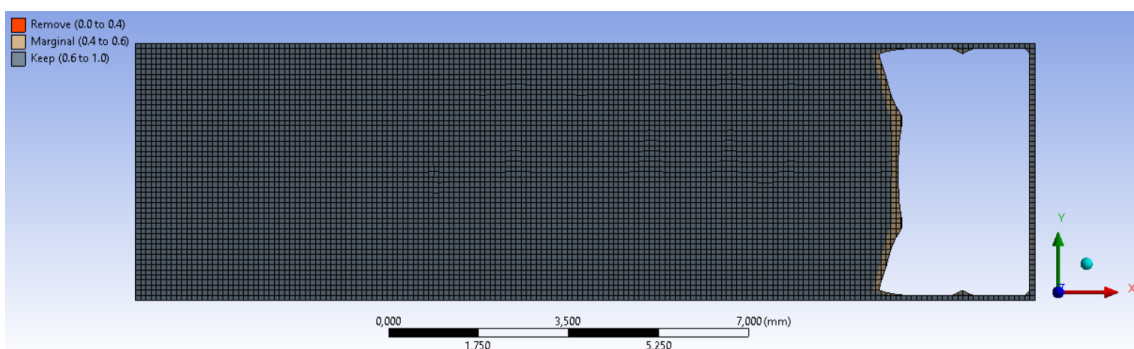


Figura G.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 85%.

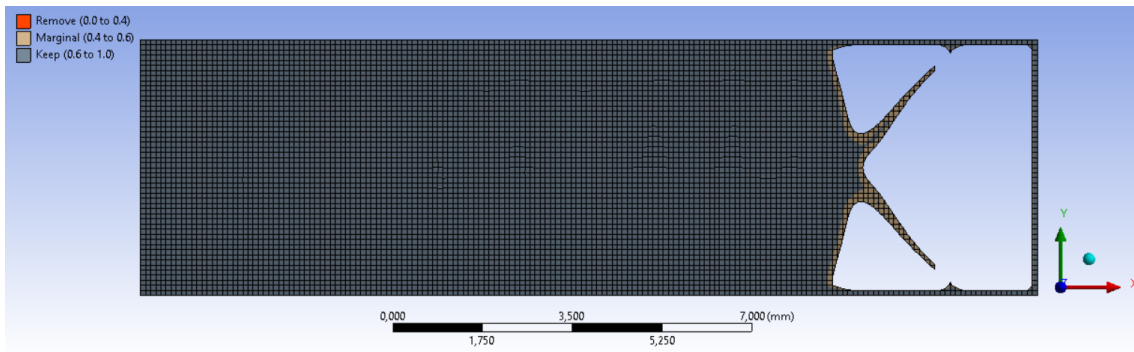


Figura G.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 80%.

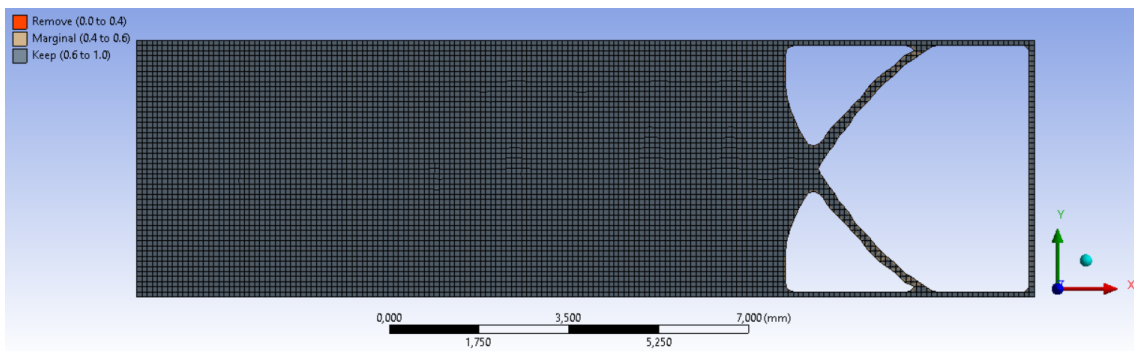


Figura G.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 75%.

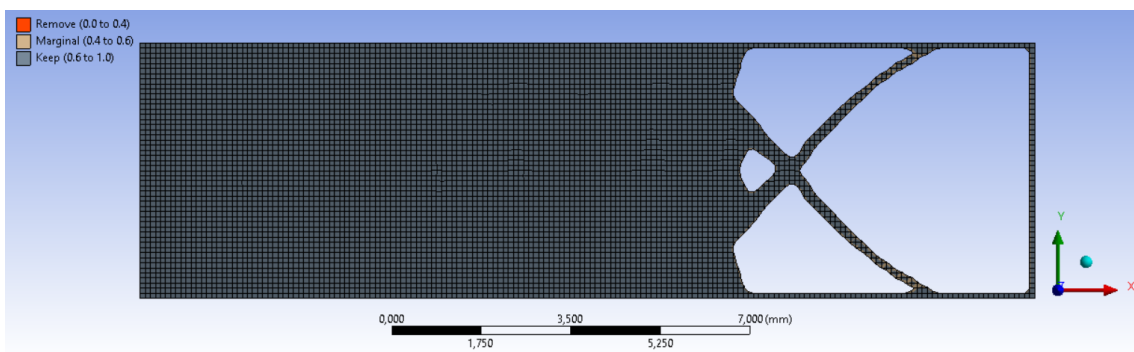


Figura G.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 70%.

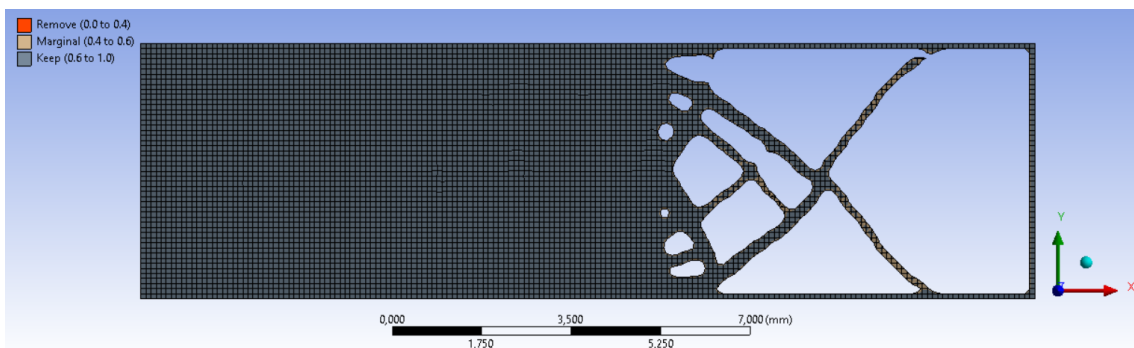


Figura G.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 65%.

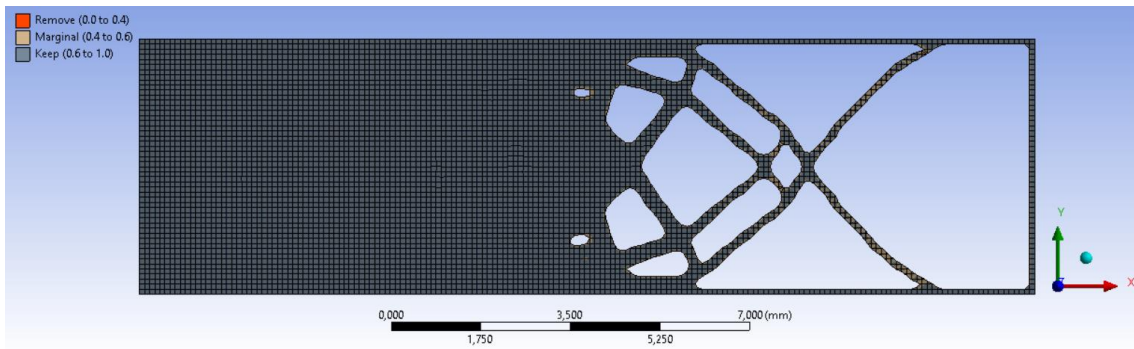


Figura G.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 60%.

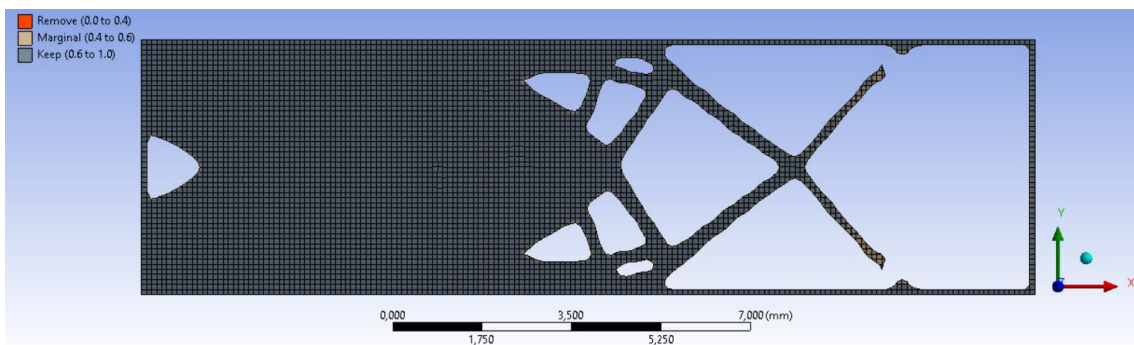


Figura G.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 55%.

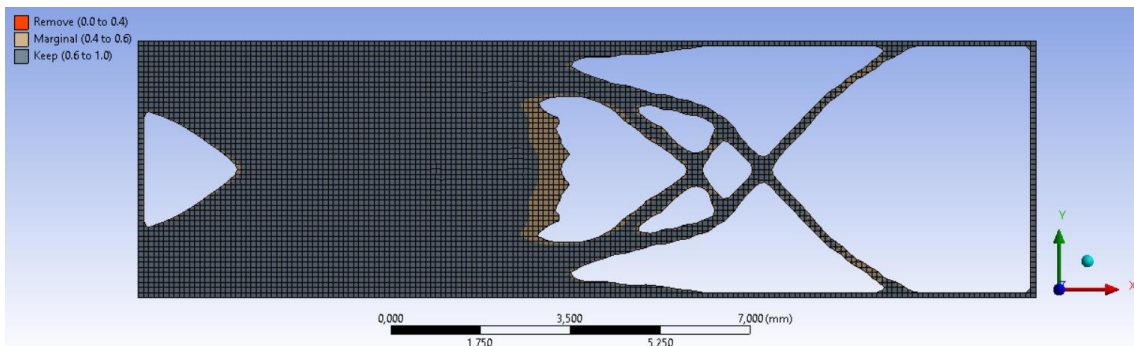


Figura G.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 50%.

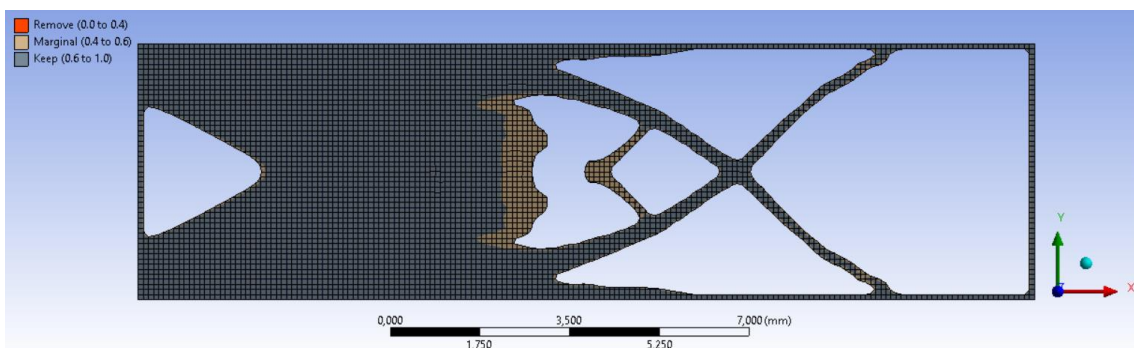


Figura G.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 45%.

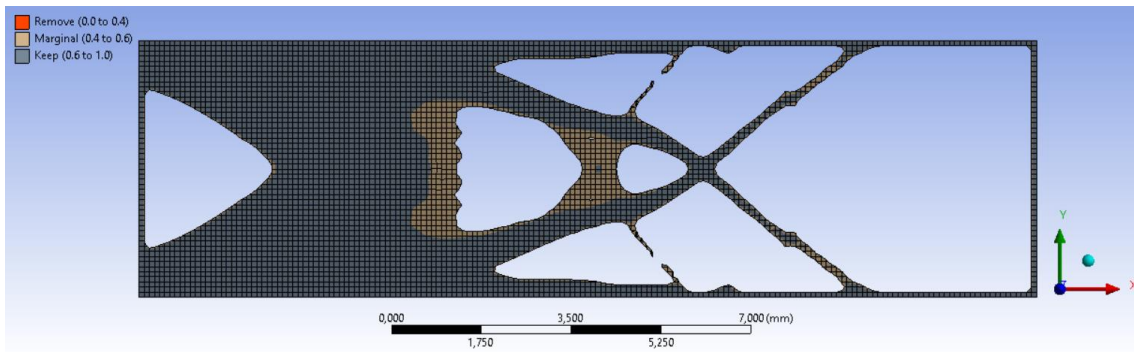


Figura G.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 40%.

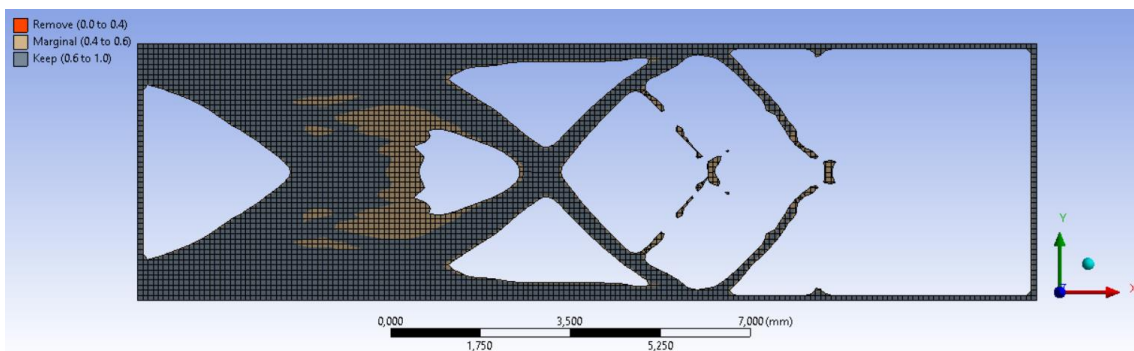


Figura G.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 35%.

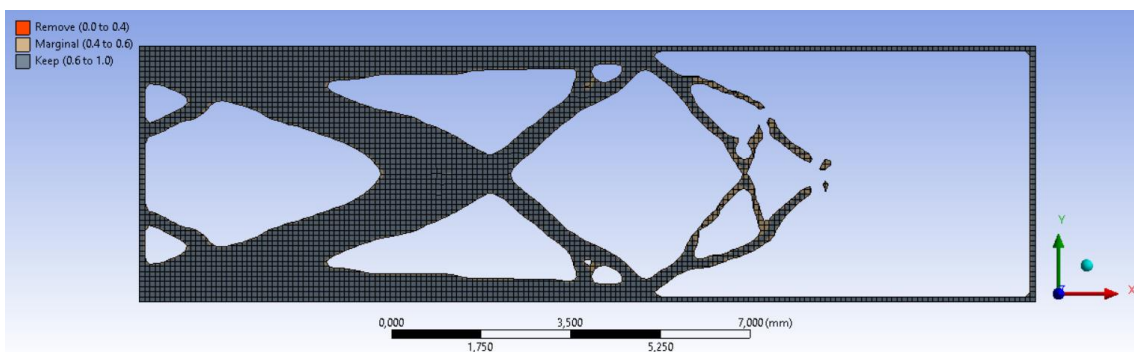


Figura G.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 30%.

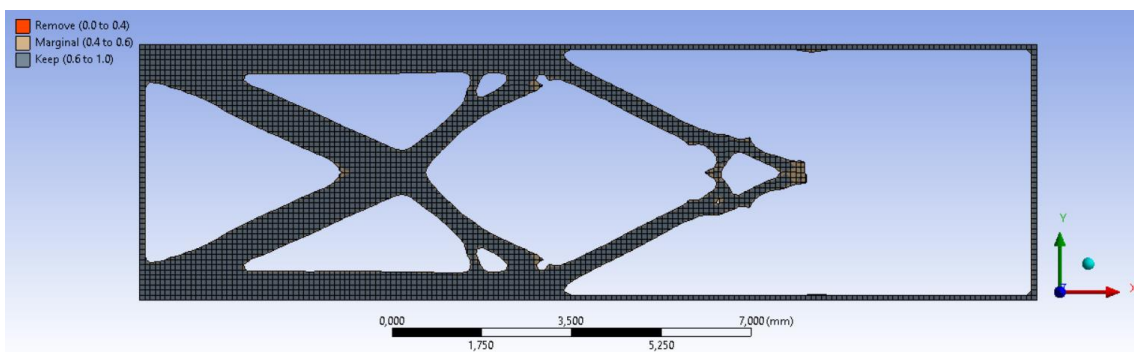


Figura G.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 25%.

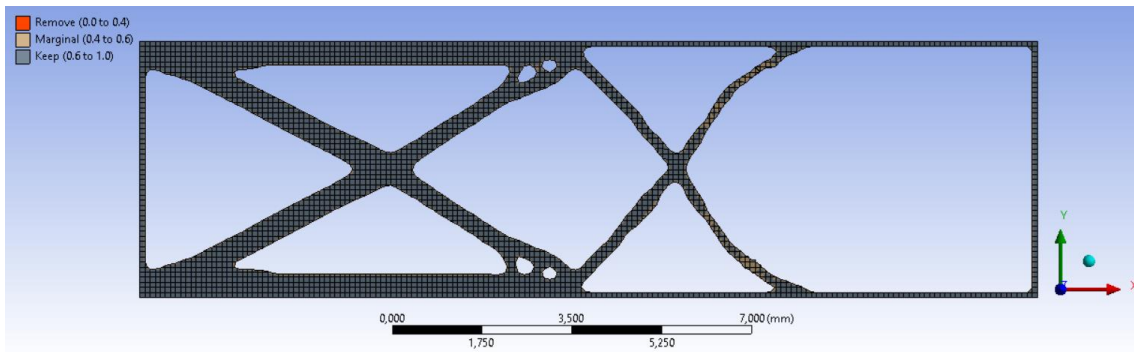


Figura G.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 20%.

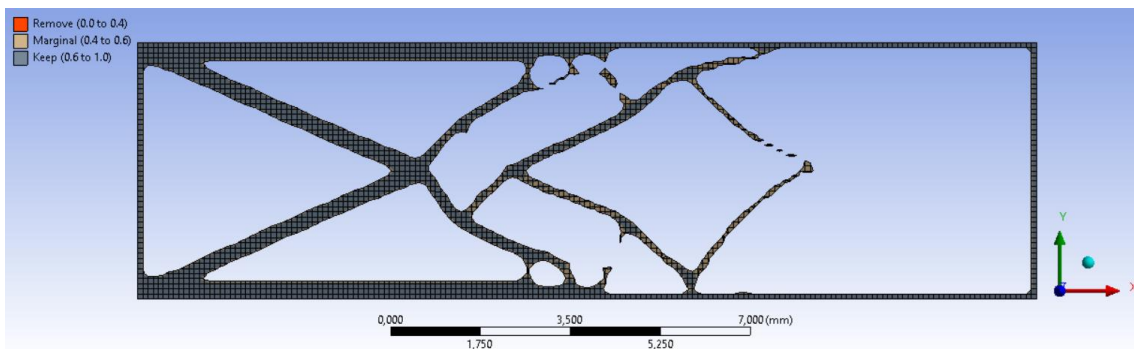


Figura G.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 15%.

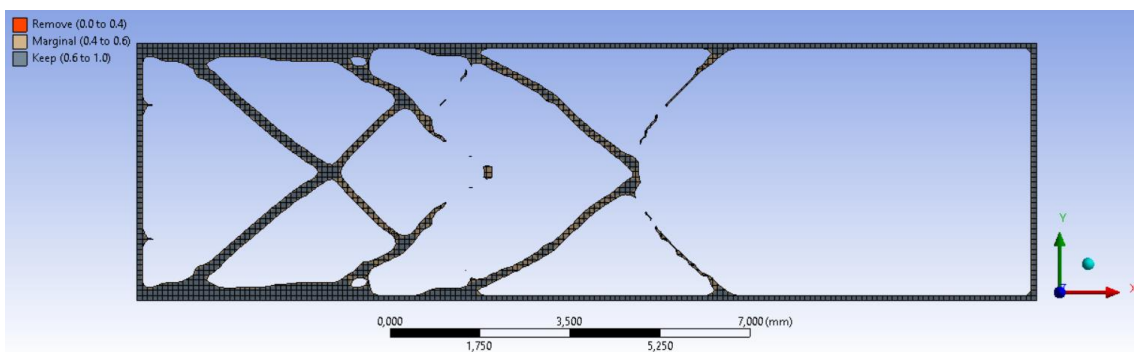


Figura G.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 10%.

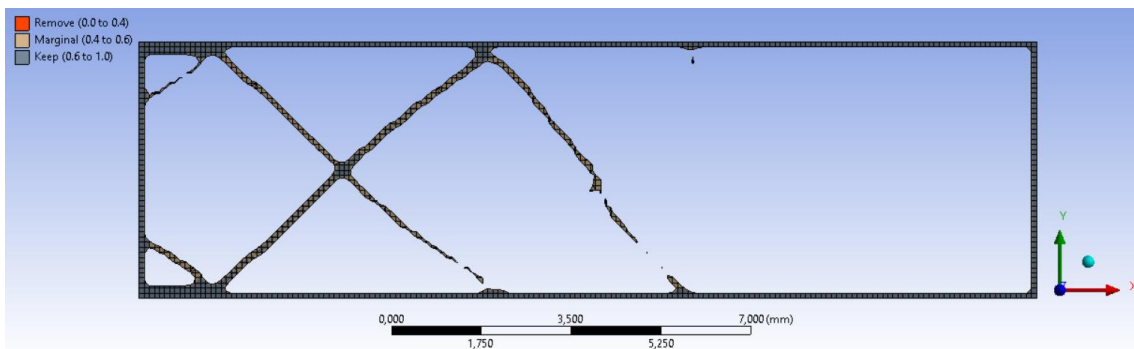


Figura G.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal – iteração dos 5%.

## ANEXO H

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez dinâmica da microviga com 5 mm de espessura.

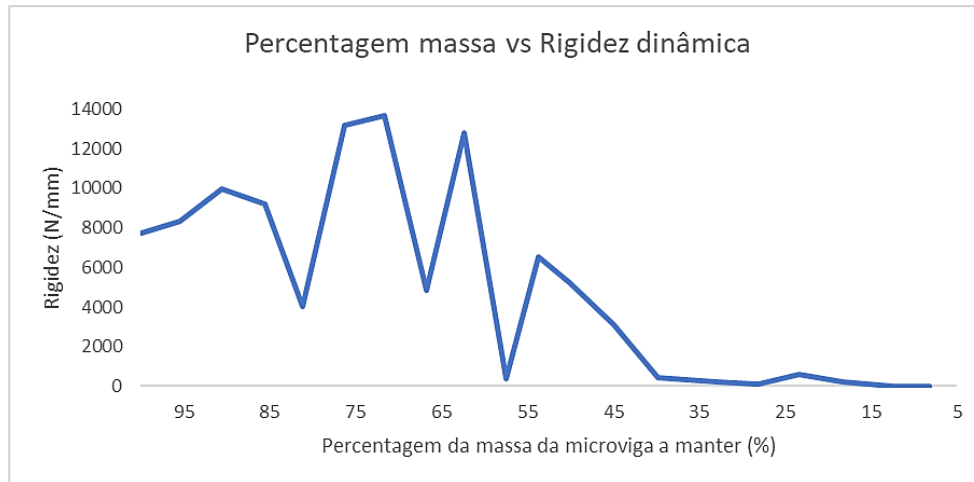


Figura H.1 - Gráfico da porcentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura.

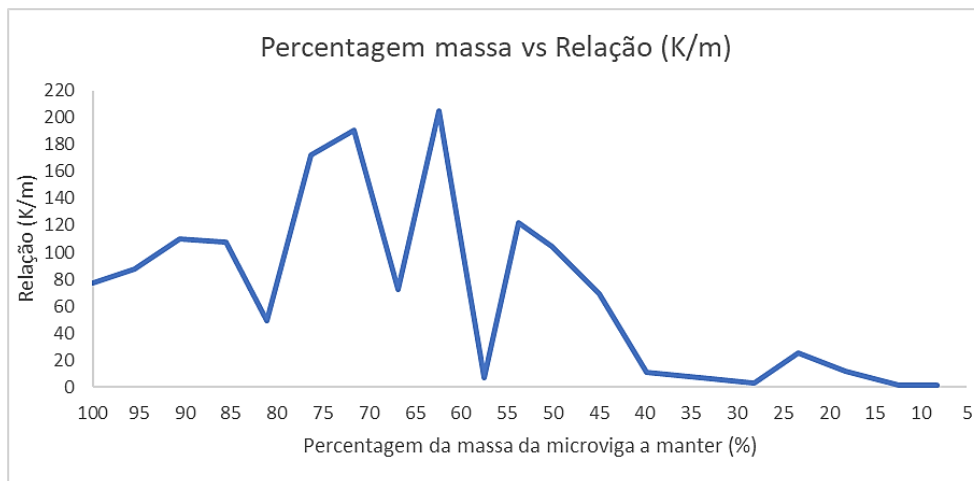


Figura H.2 - Gráfico da porcentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura.

## ANEXO I

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método modal, com 5 mm de espessura, com massa concentrada na extremidade livre da microviga.

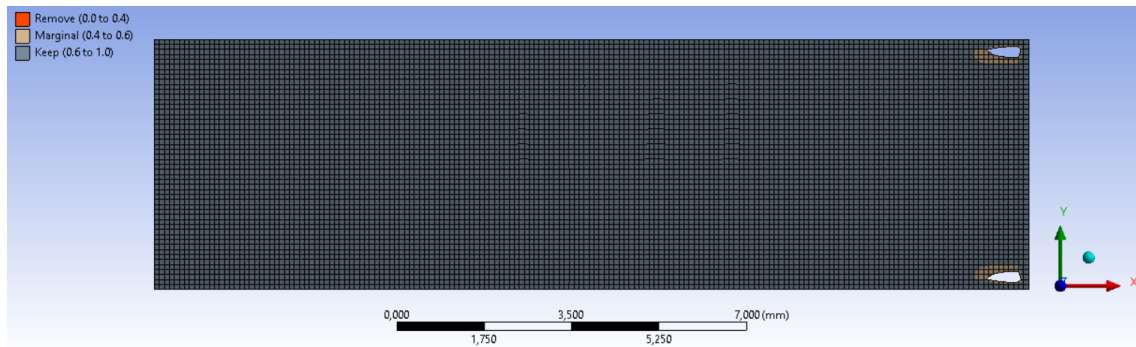


Figura I.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 95%.

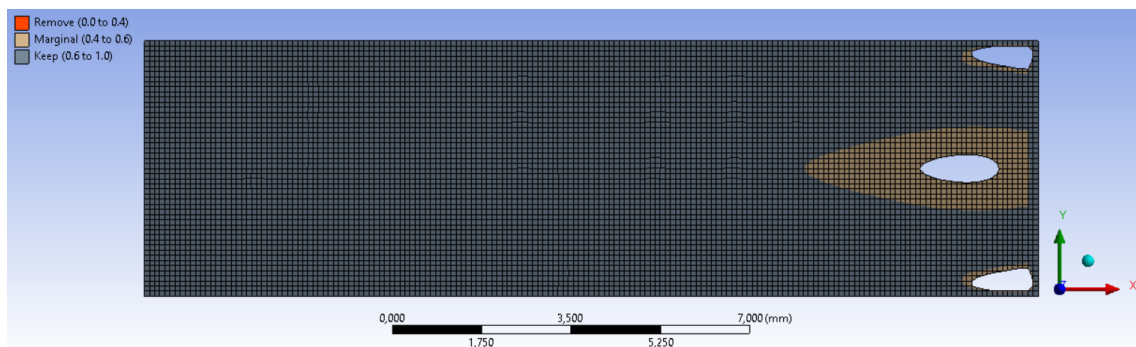


Figura I.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 90%.

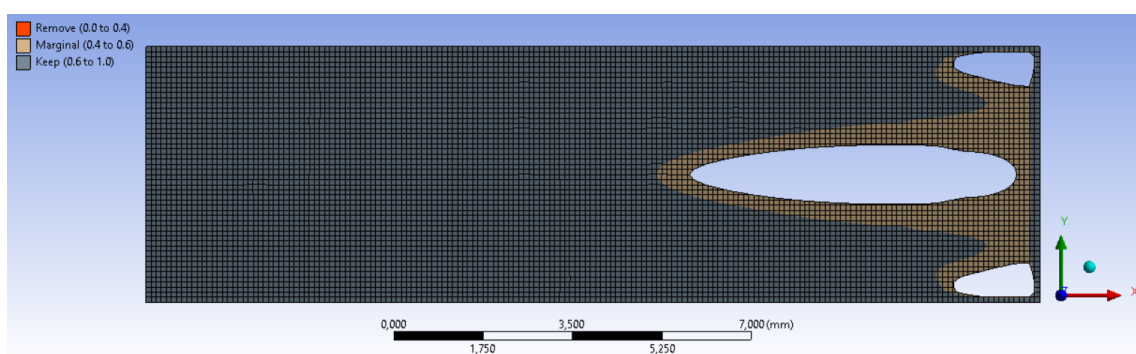


Figura I.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 85%.

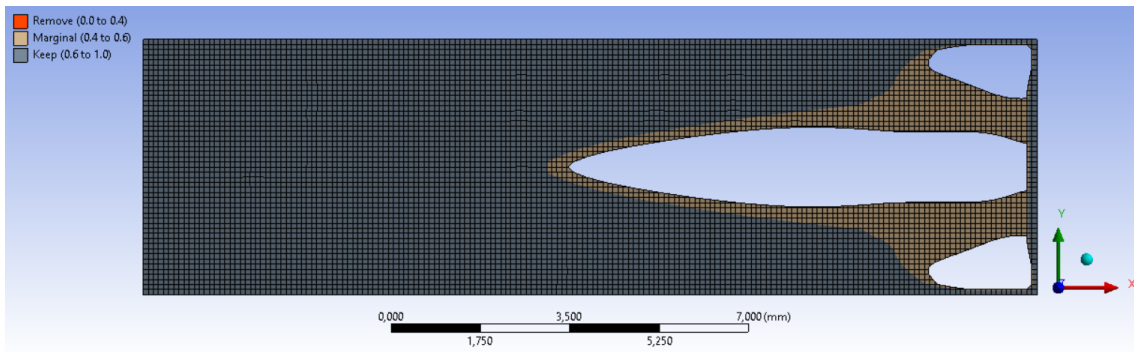


Figura I.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 80%.

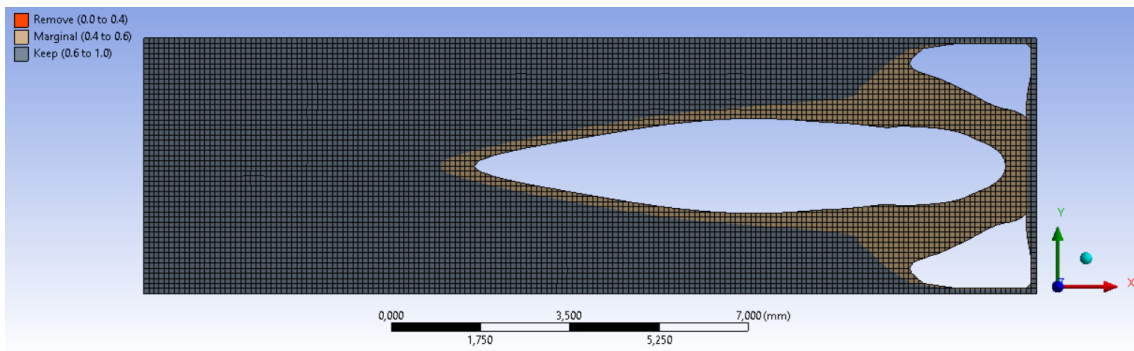


Figura I.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 75%.

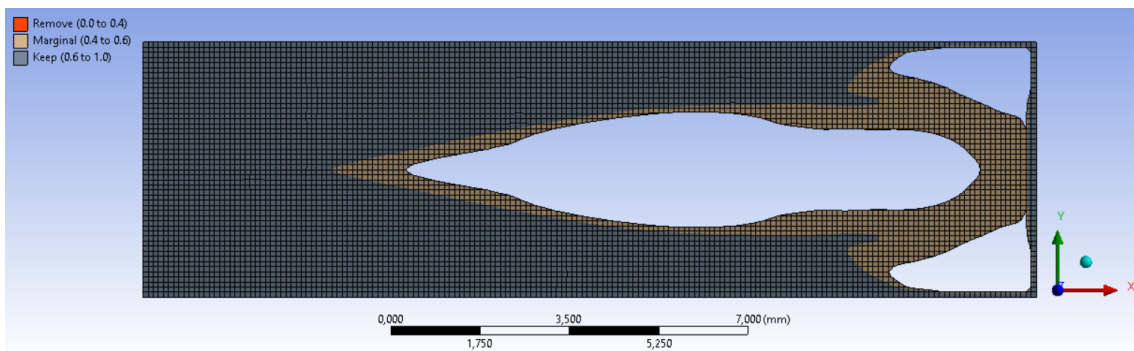


Figura I.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 70%.

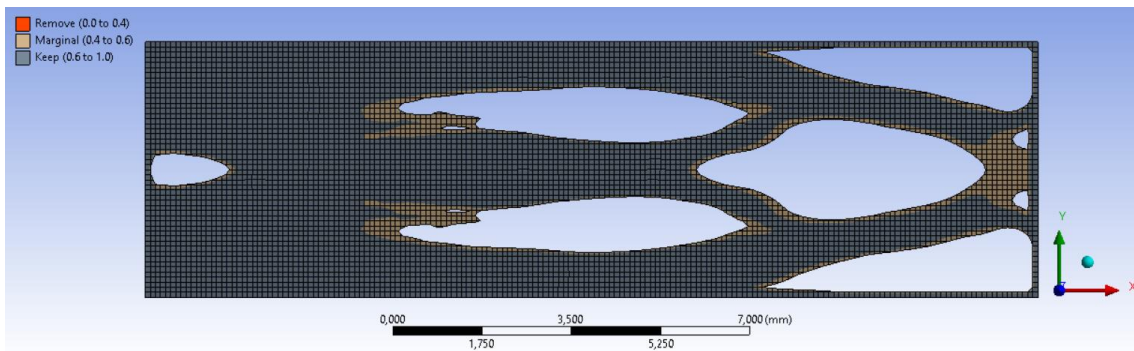


Figura I.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 65%.



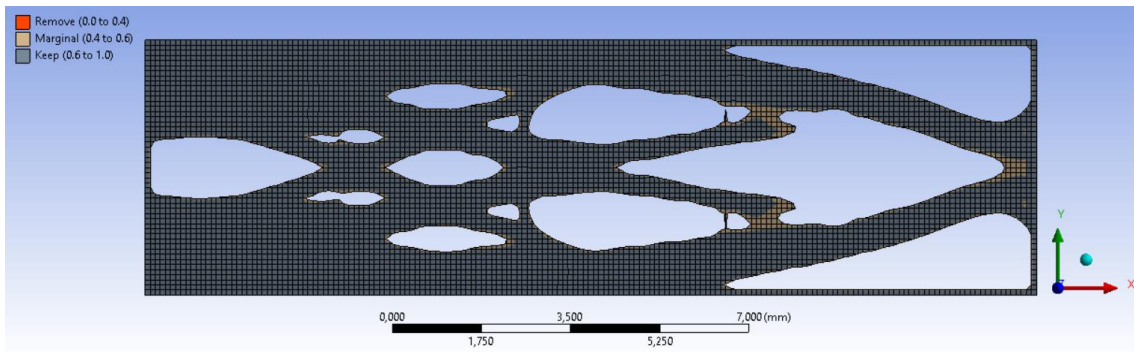


Figura I.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 60%.

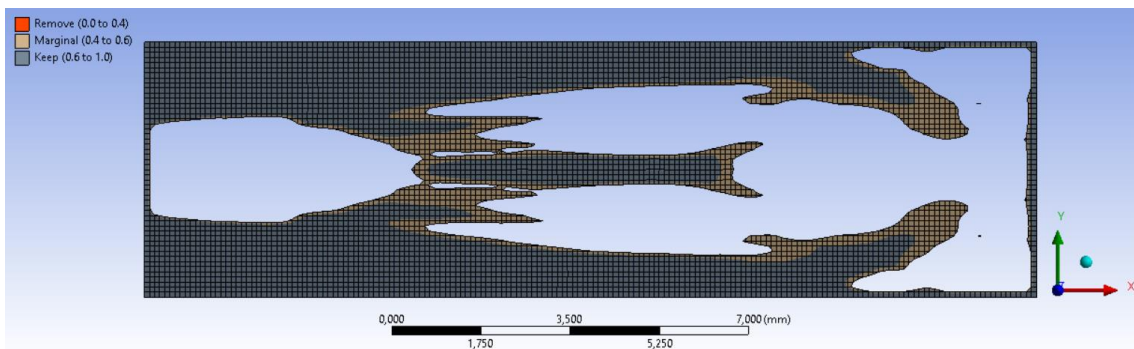


Figura I.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 55%.

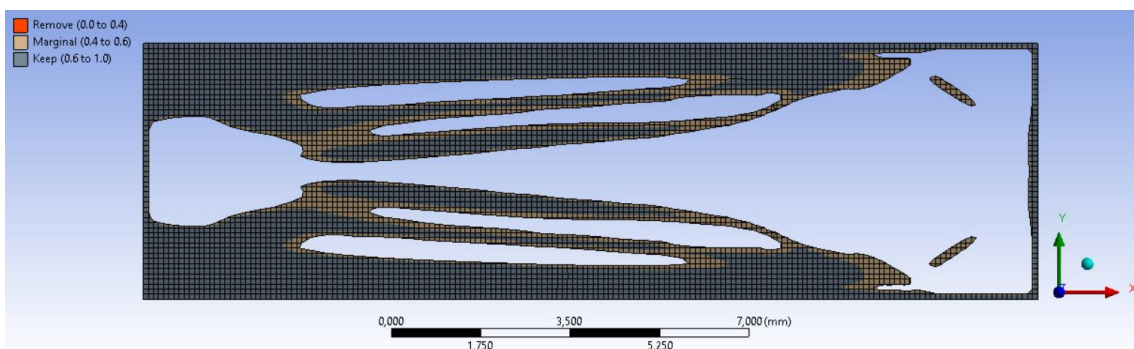


Figura I.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 50%.

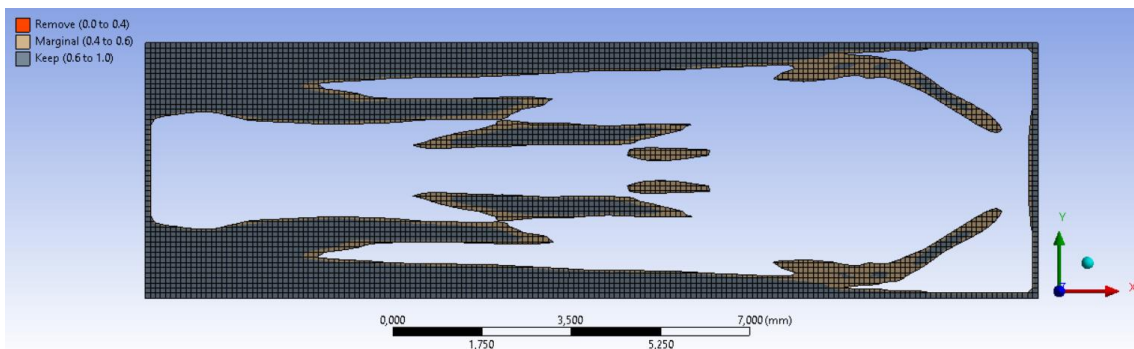


Figura I.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 45%.

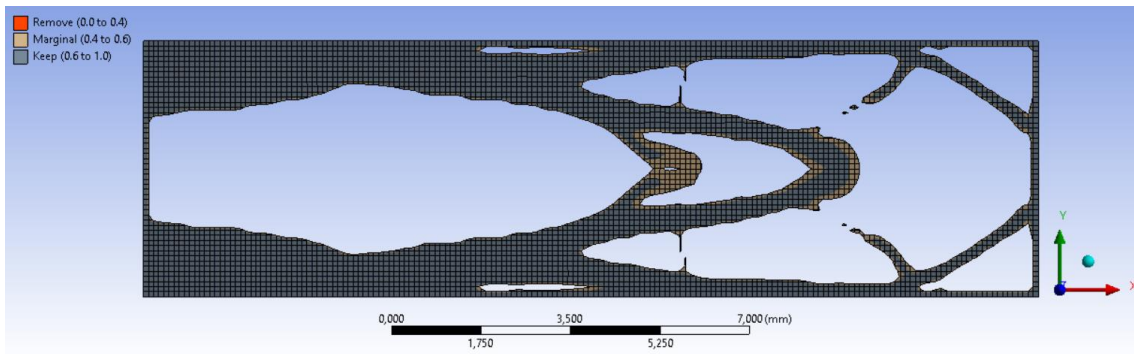


Figura I.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 40%.

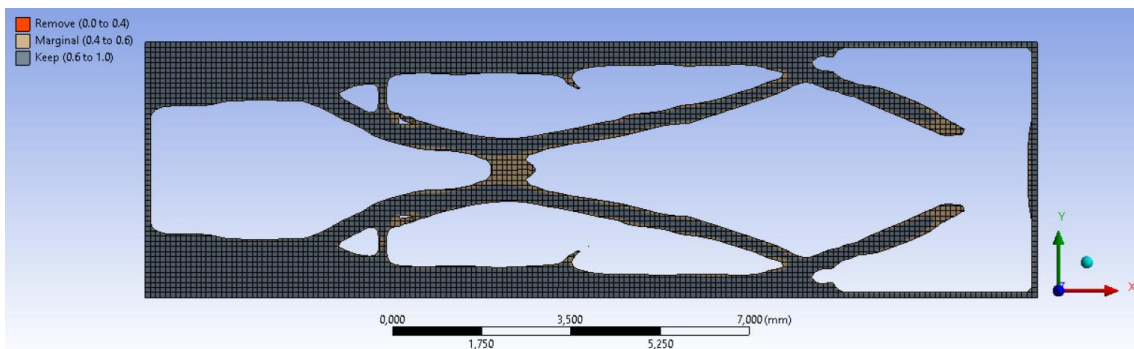


Figura I.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 35%.

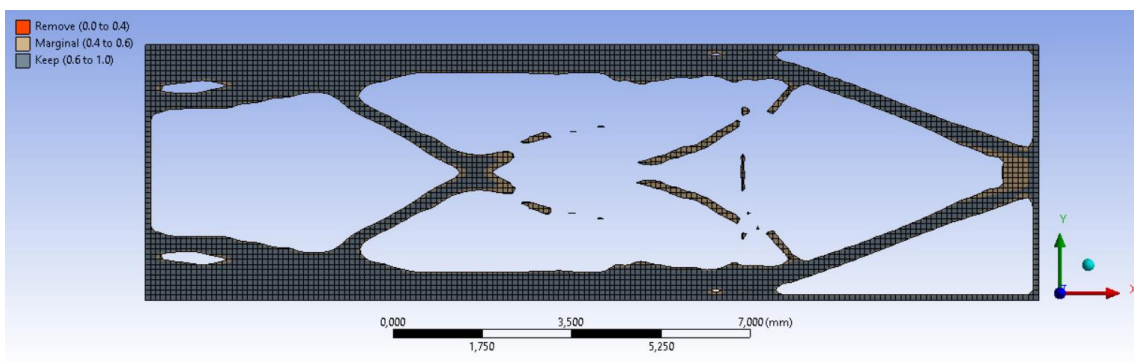


Figura I.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 30%.

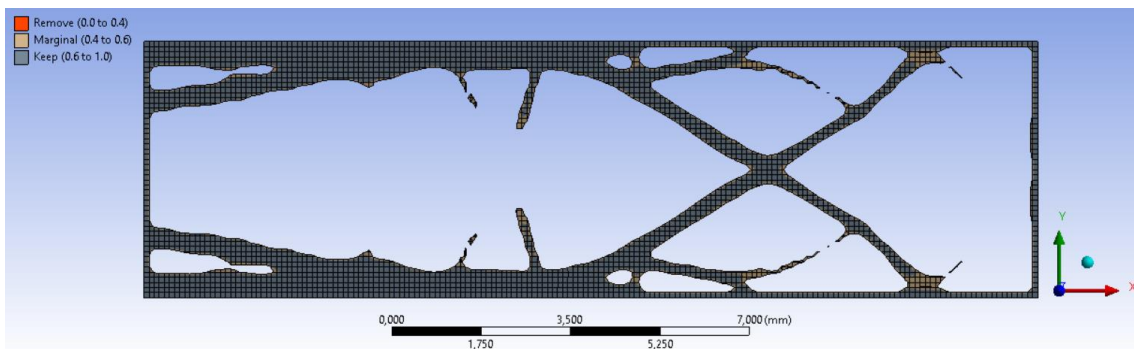


Figura I.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 25%.

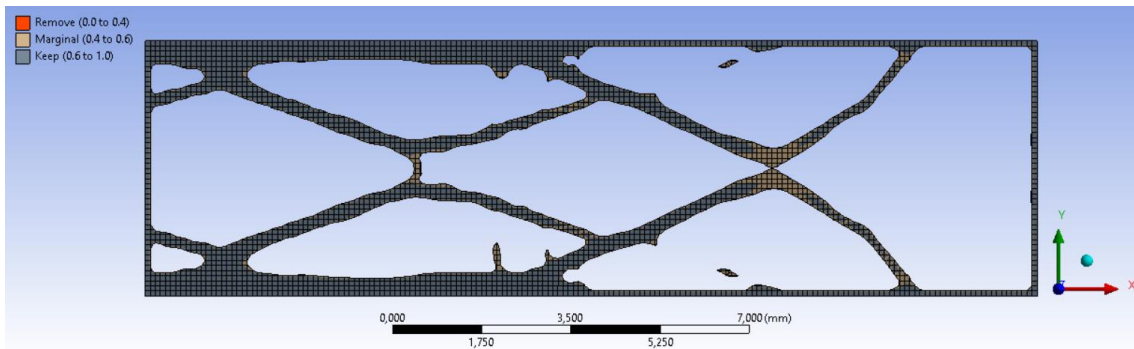


Figura I.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 20%.

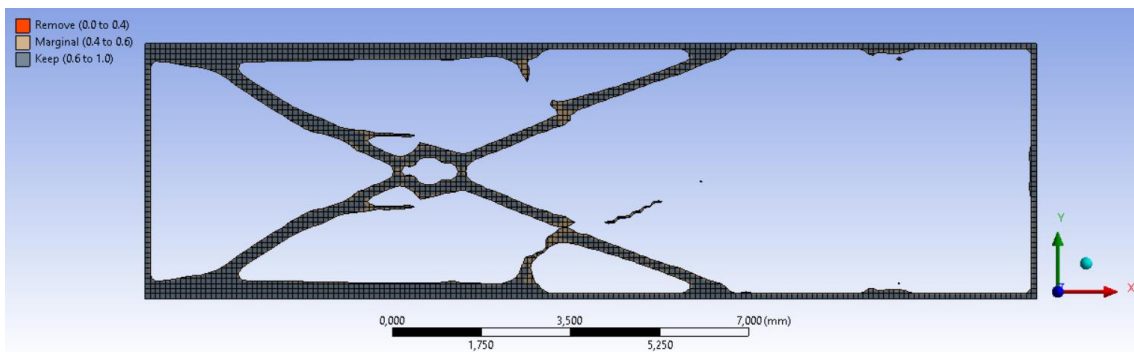


Figura I.17 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 15%.

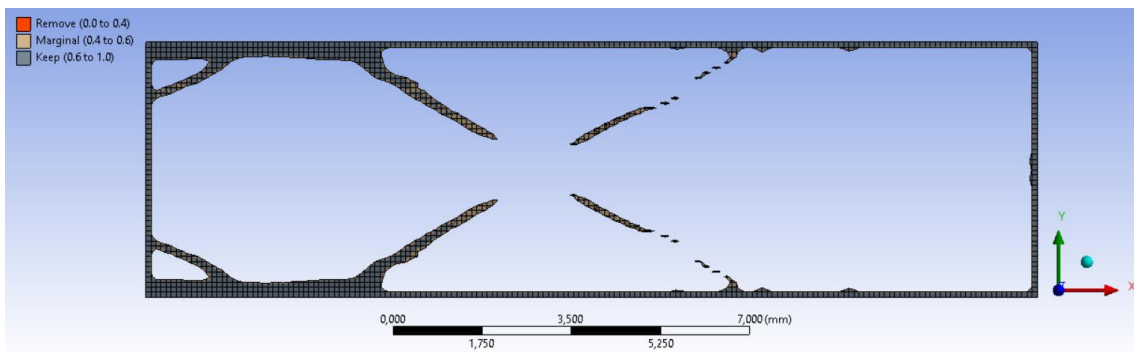


Figura I.18 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 10%.

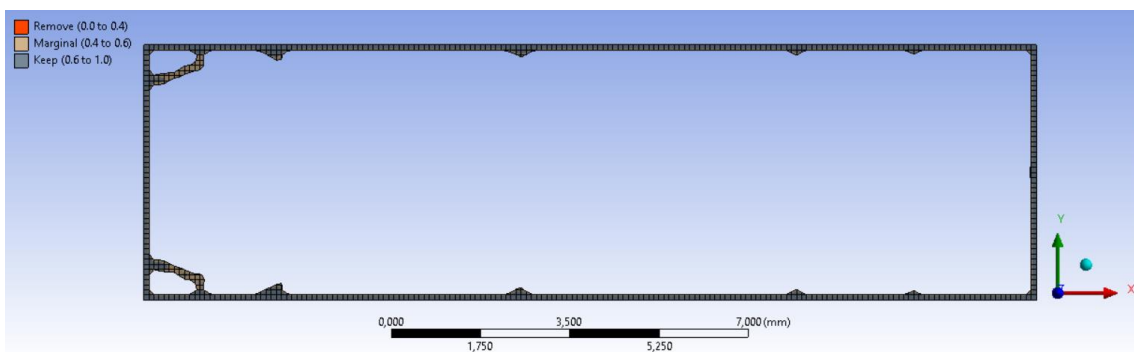


Figura I.19 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada – iteração dos 5%.

## ANEXO J

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez dinâmica da microviga com 5 mm de espessura, com massa concentrada.

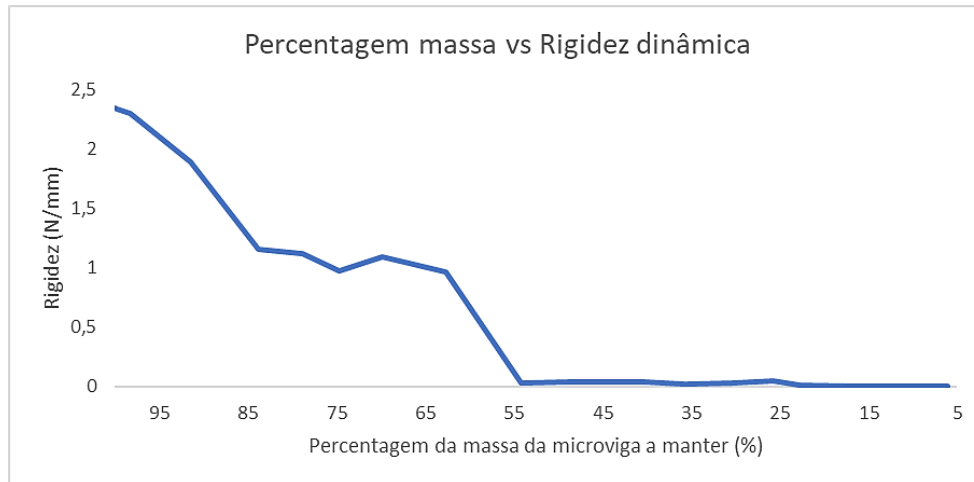


Figura J.1 - Gráfico da porcentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada.

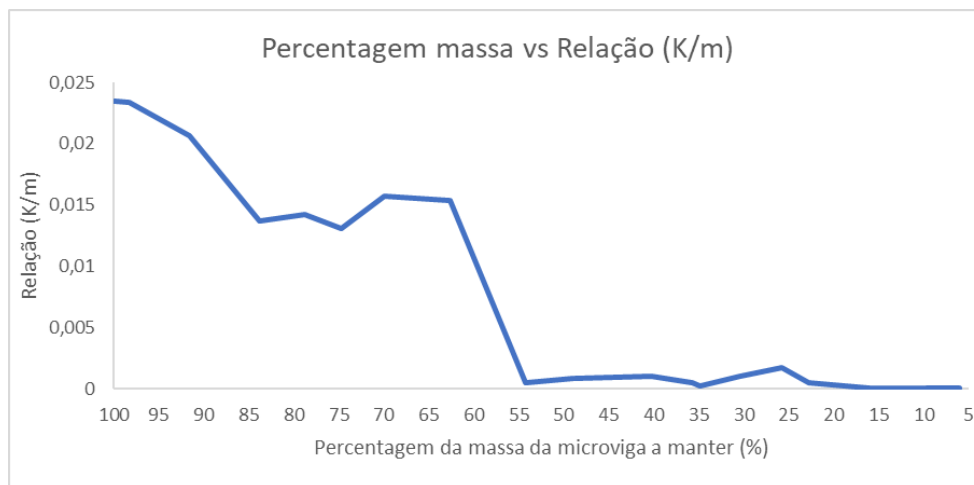


Figura J.2 - Gráfico da porcentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada.

## ANEXO L

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método estático, com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de fabrico.

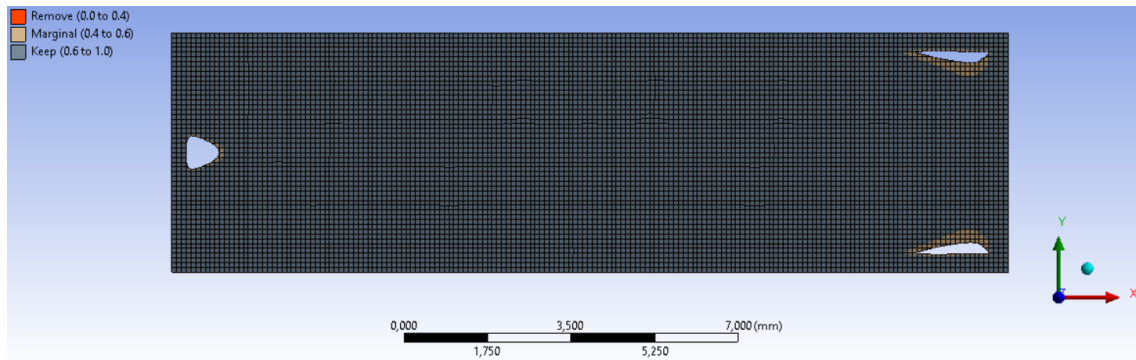


Figura L.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 95%.

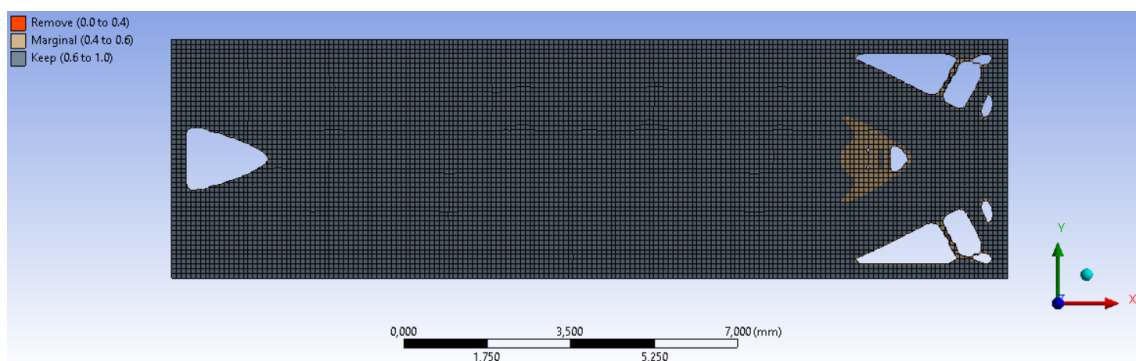


Figura L.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 90%.

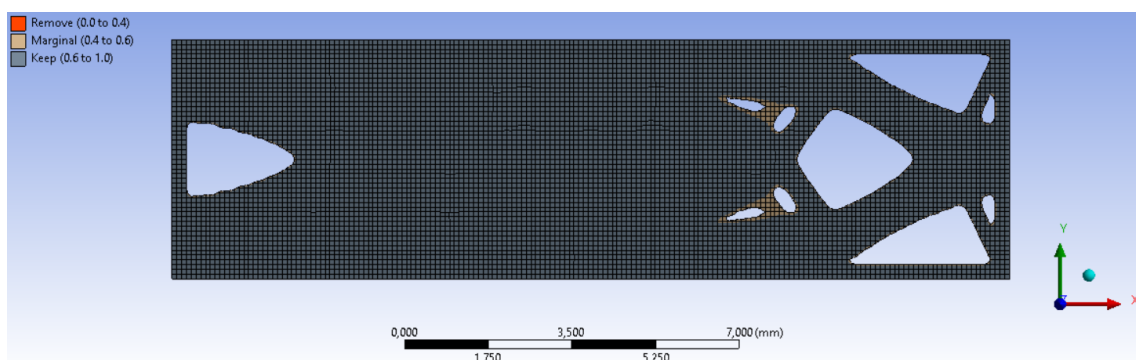


Figura L.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 85%.

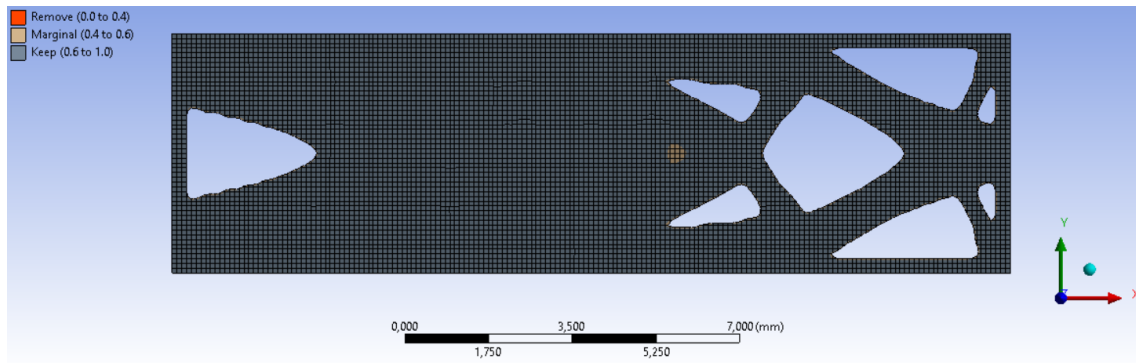


Figura L.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 80%.

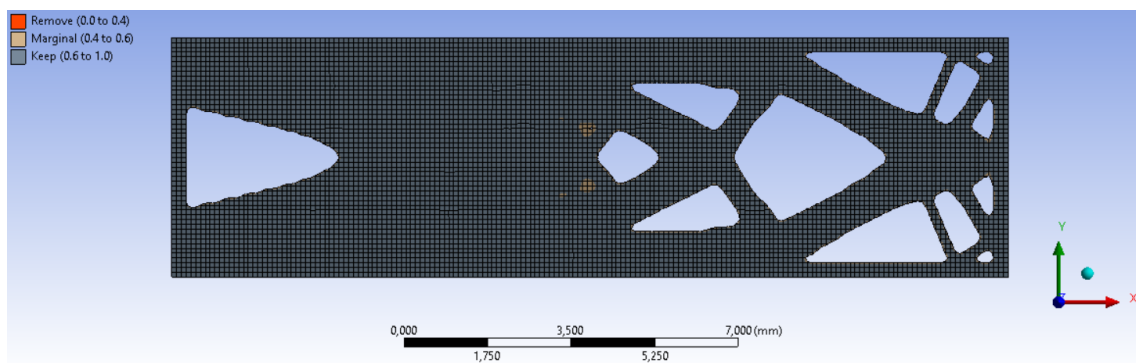


Figura L.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 75%.

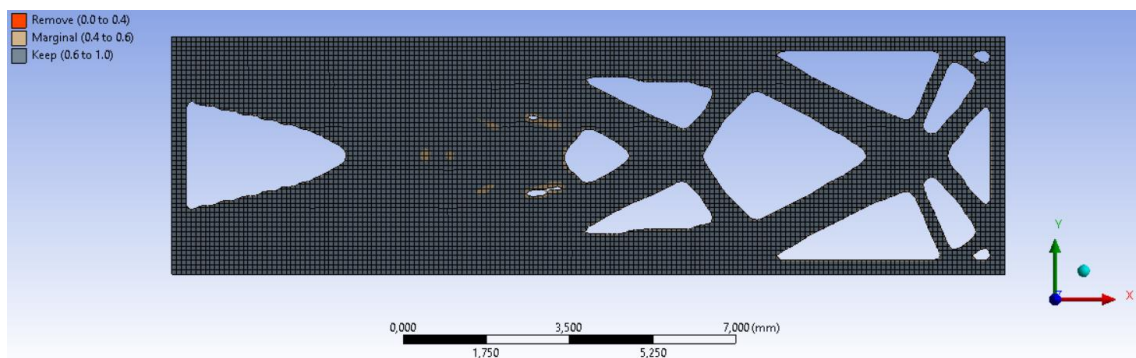


Figura L.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 70%.

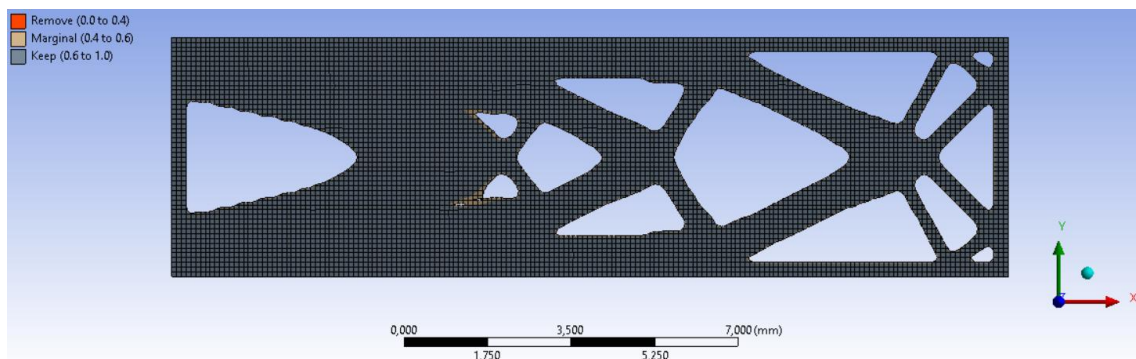


Figura L.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 65%.

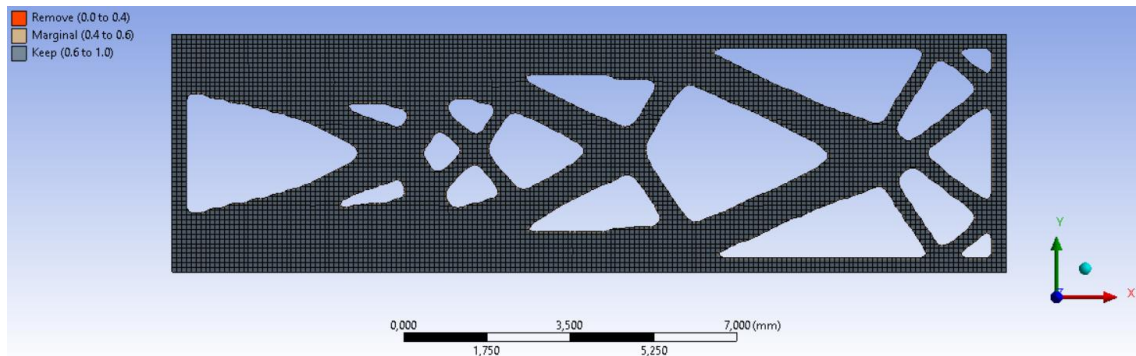


Figura L.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 60%.

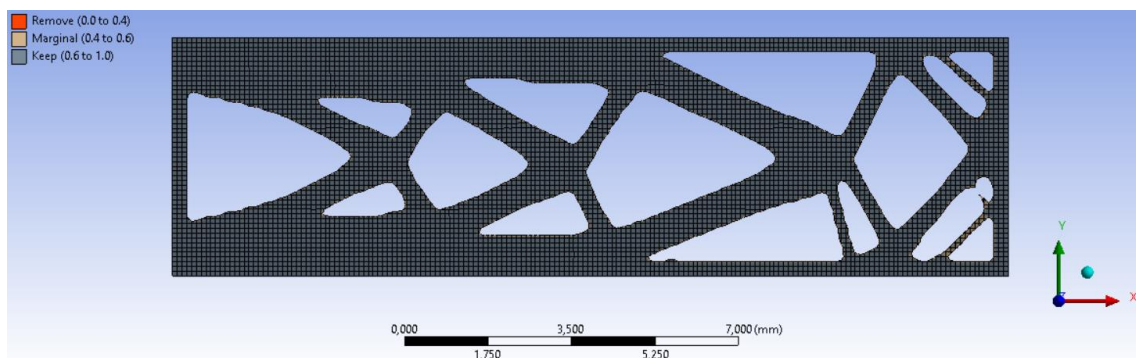


Figura L.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 55%.

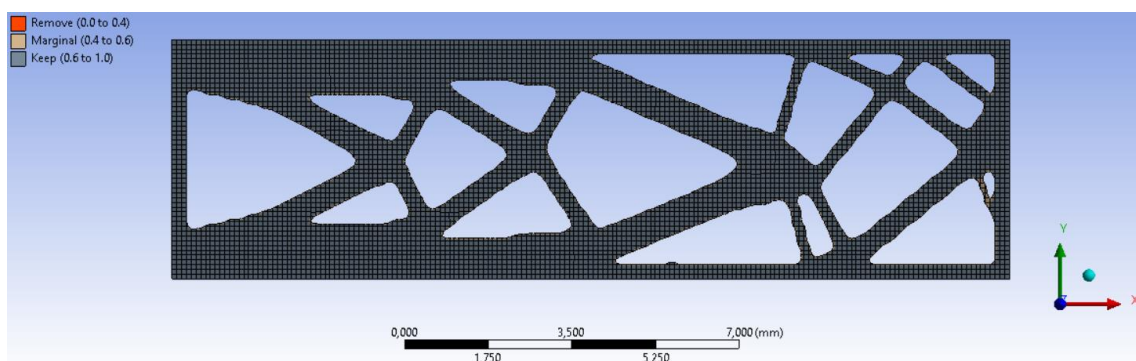


Figura L.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 50%.

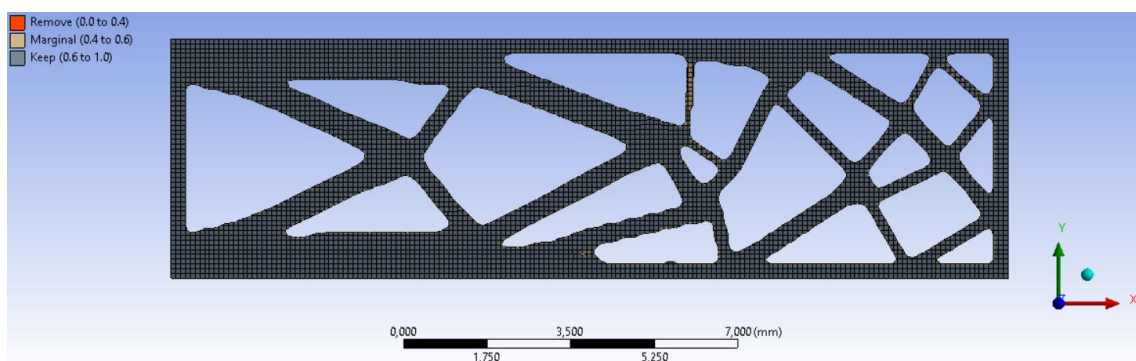


Figura L.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 45%.

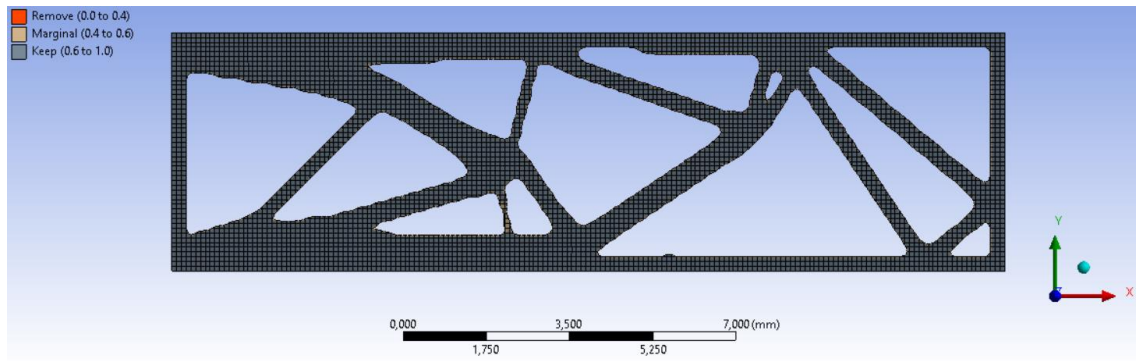


Figura L.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 40%.

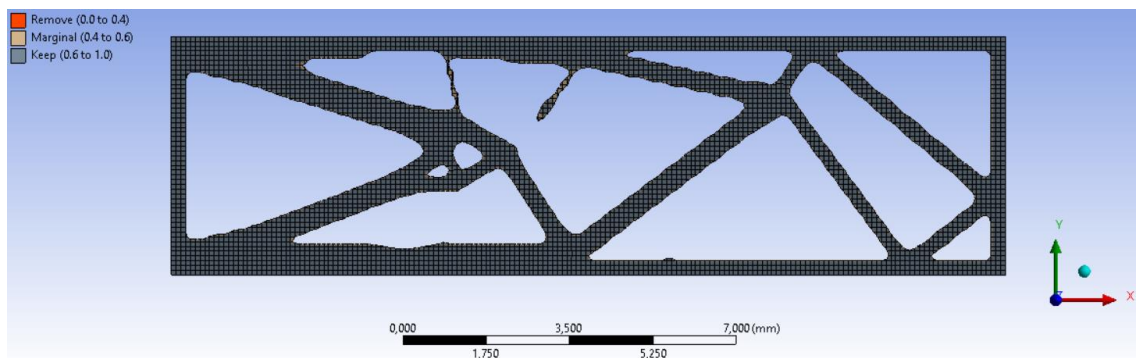


Figura L.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 35%.

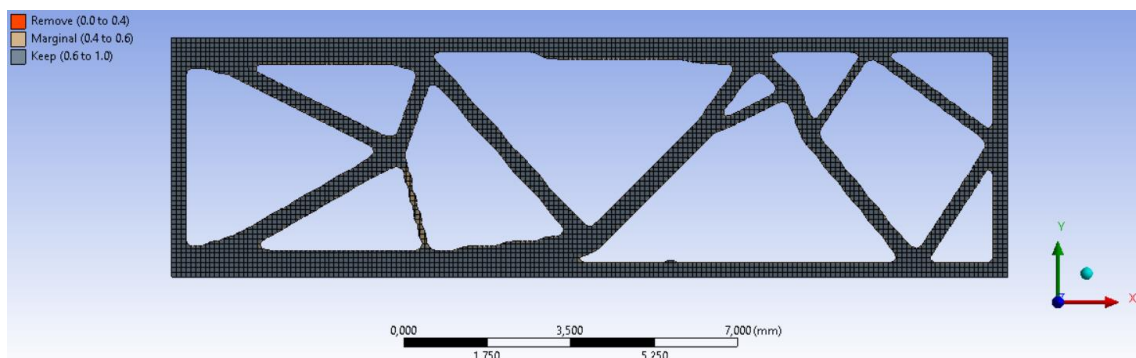


Figura L.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 30%.

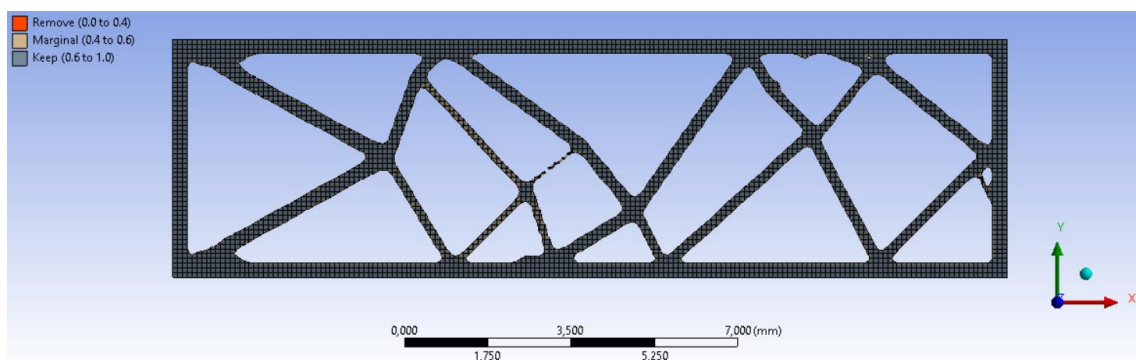


Figura L.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 25%.



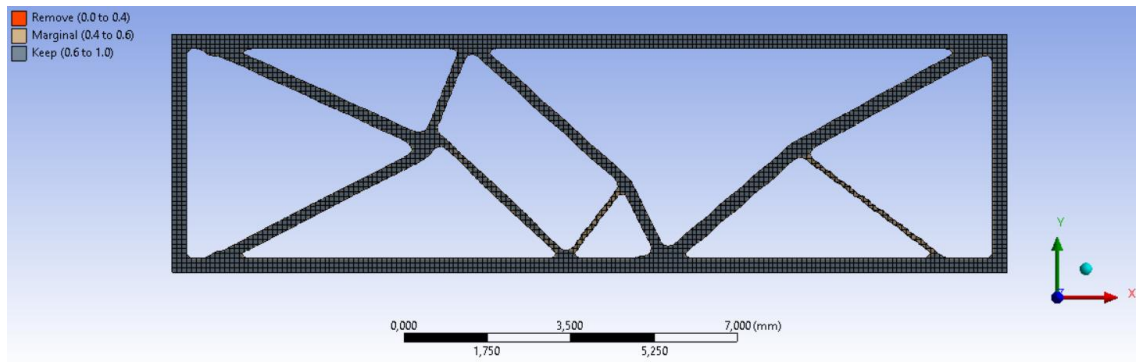


Figura L.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo *Static Structural*, c/ rest. fabrico – iteração 20%.

## ANEXO M

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez estática da microviga com 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com a restrição efetuada de fabrico.

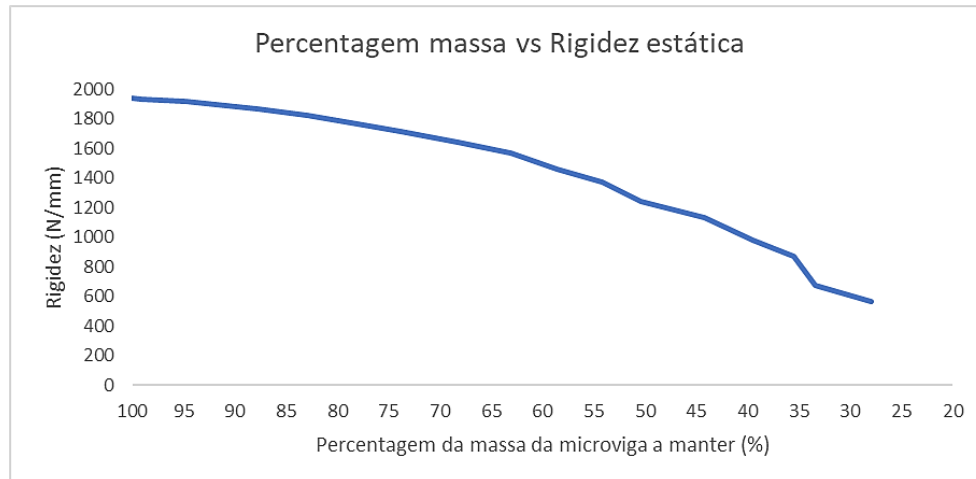


Figura M.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de fabrico.

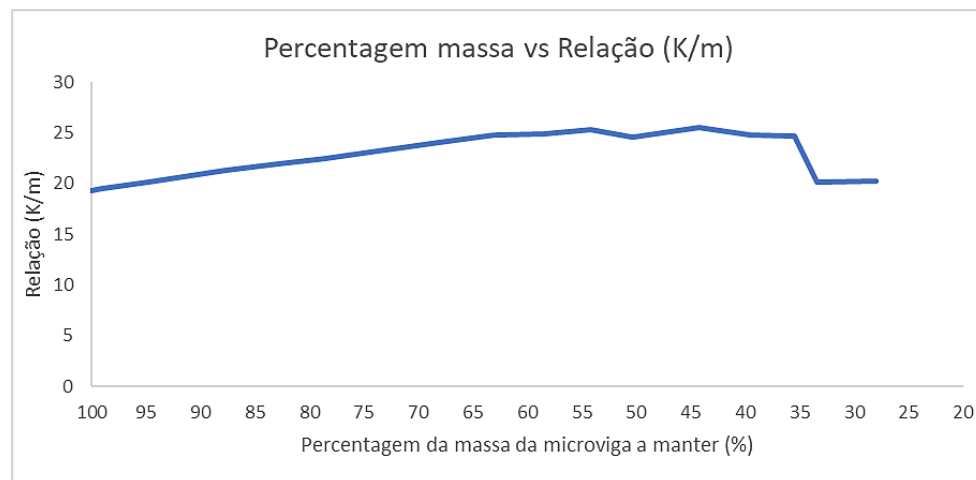


Figura M.2 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez estática com otimização da microviga de 5 mm de espessura, no estado plano de deformação, com restrição de fabrico.

## ANEXO N

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método modal, com 5 mm de espessura, com restrição de fabrico.

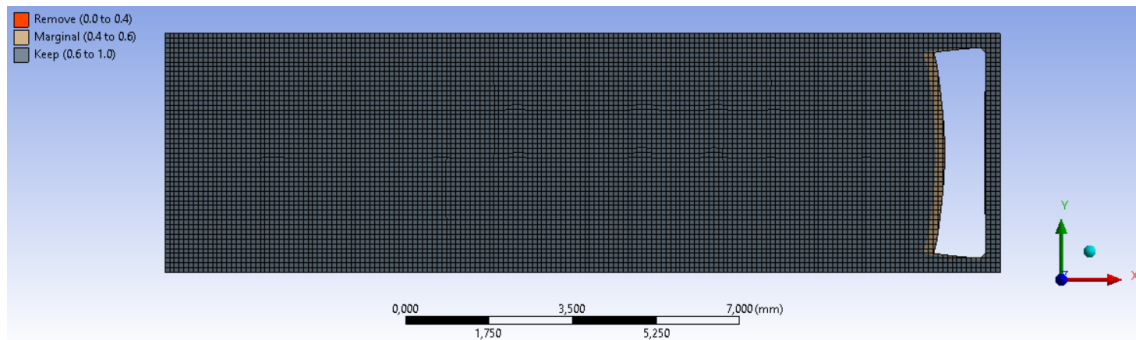


Figura N.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 95%.

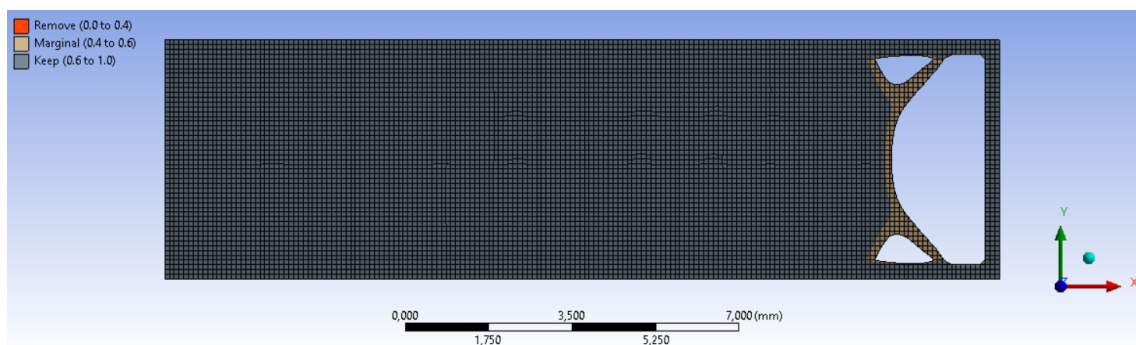


Figura N.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 90%.

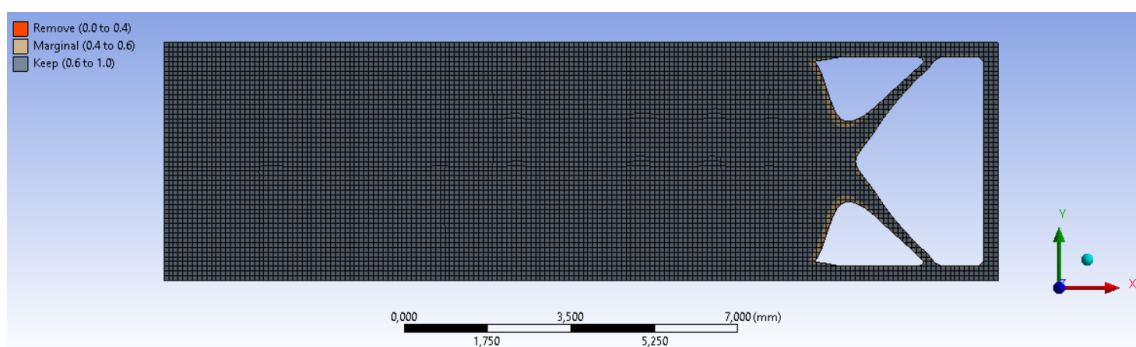


Figura N.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 85%.

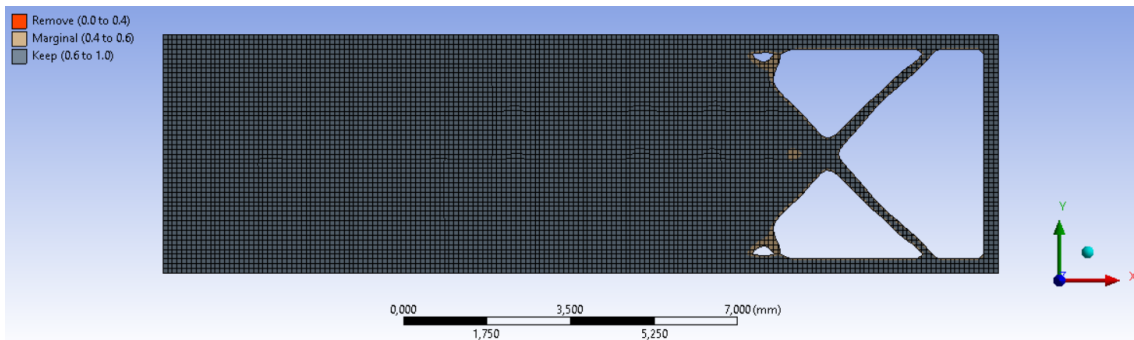


Figura N.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 80%.

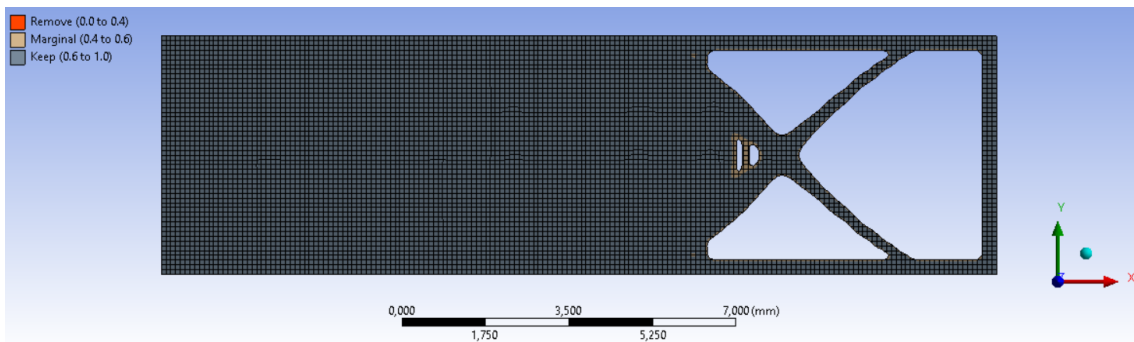


Figura N.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 75%.

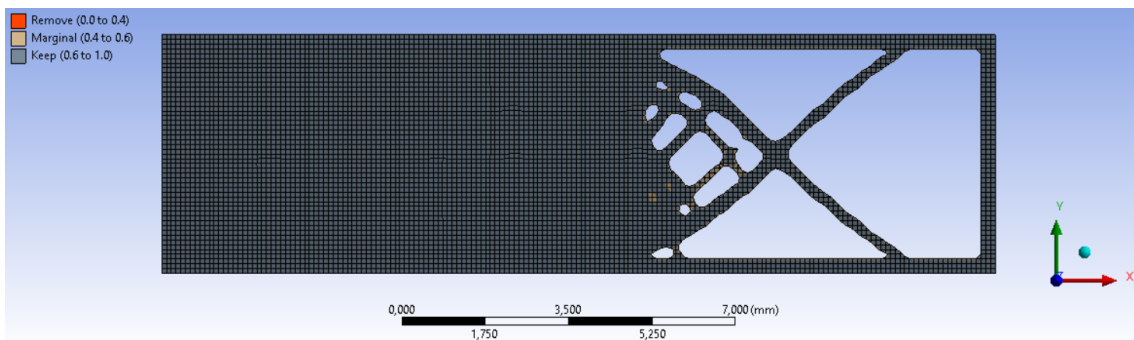


Figura N.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 70%.

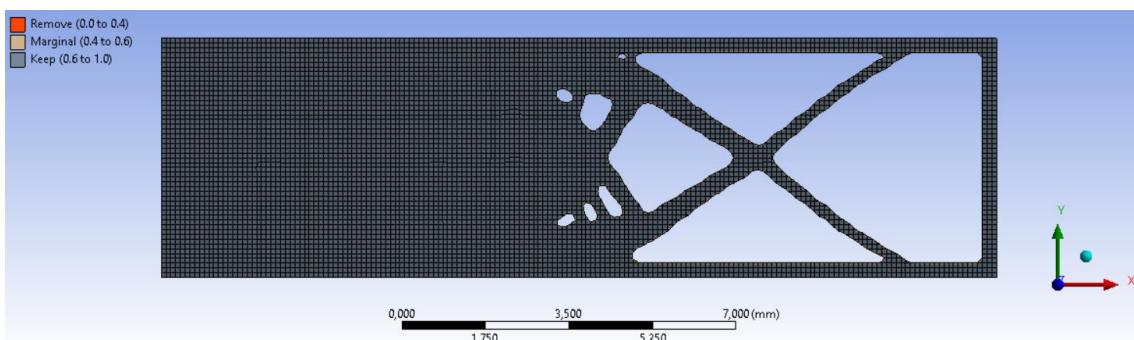


Figura N.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 65%.

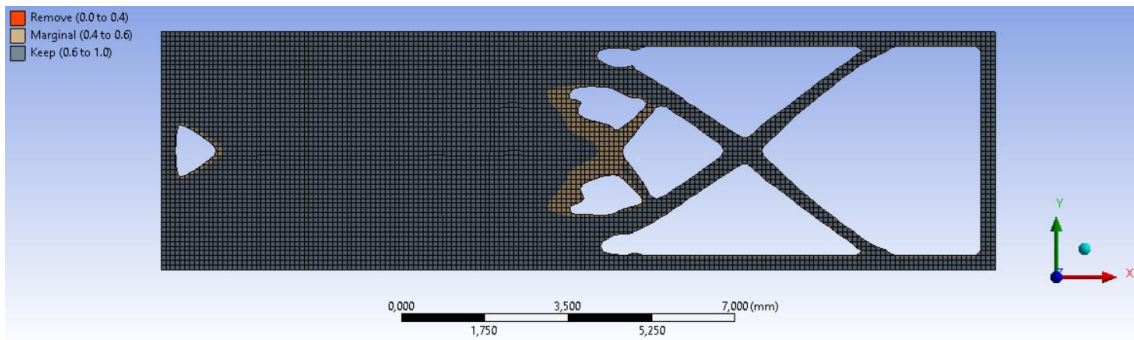


Figura N.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 60%.

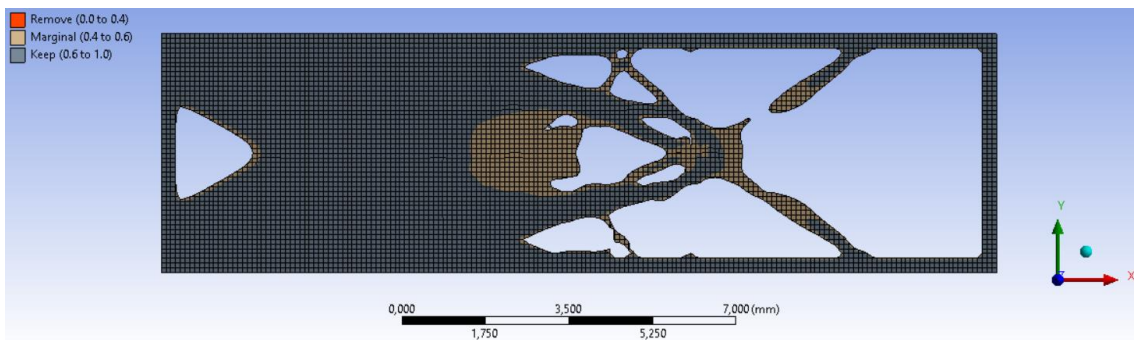


Figura N.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 55%.

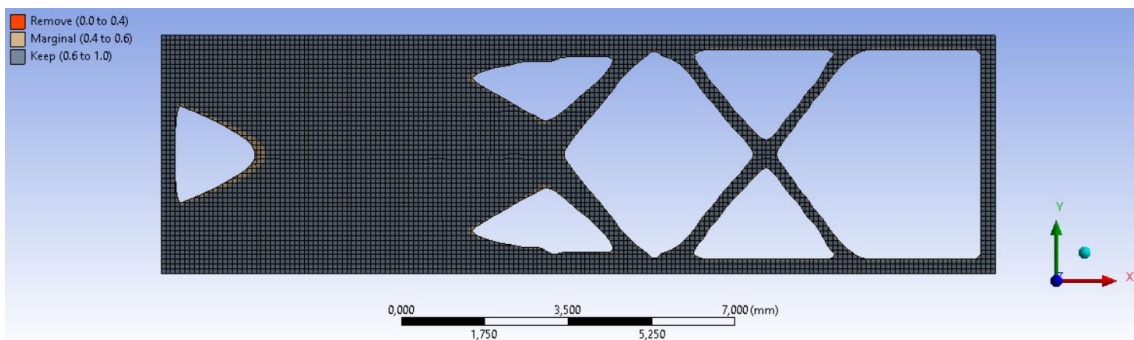


Figura N.10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 50%.

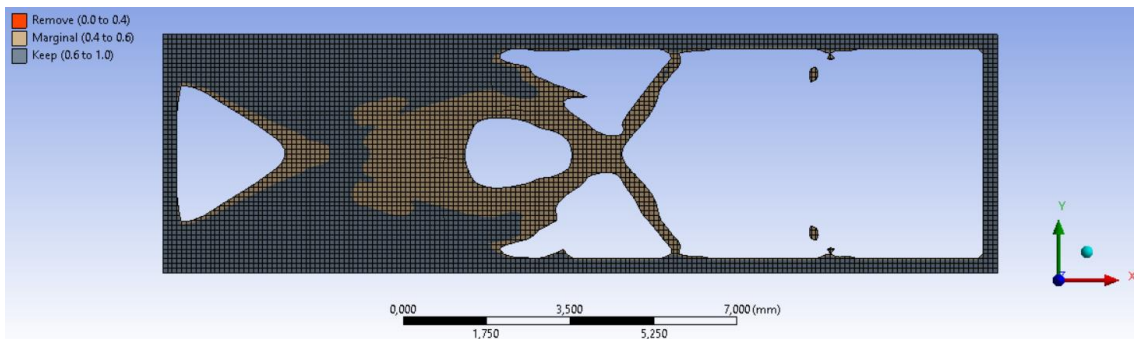


Figura N.11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 45%.

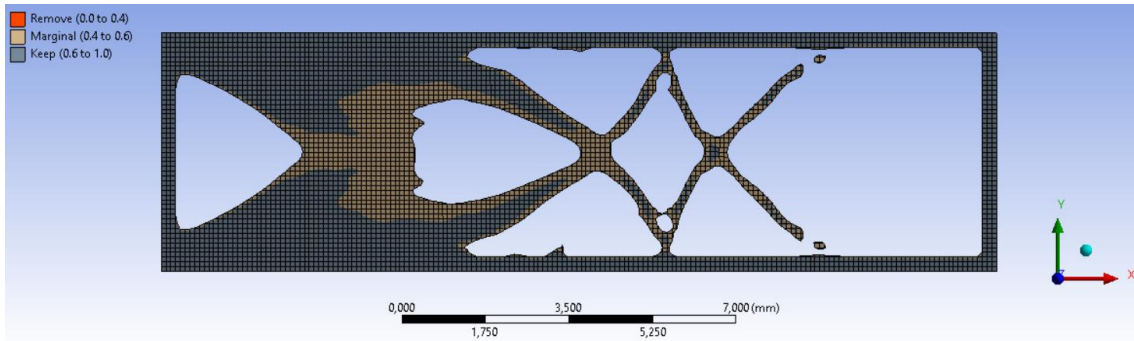


Figura N.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 40%.

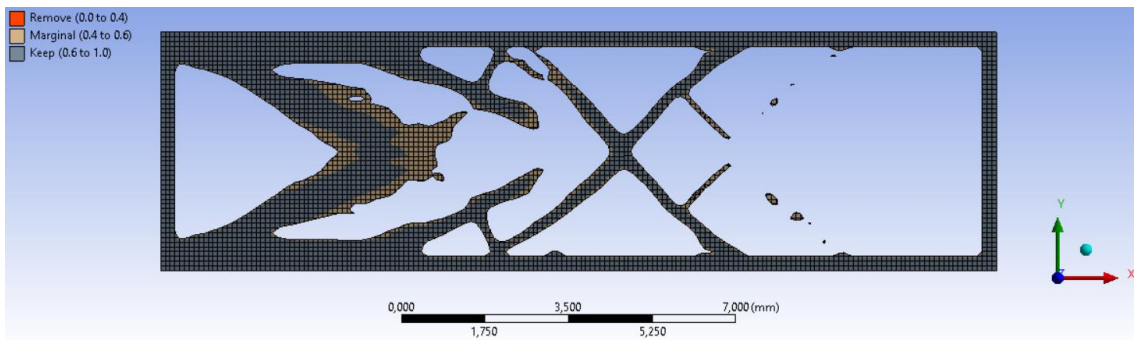


Figura N.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 35%.

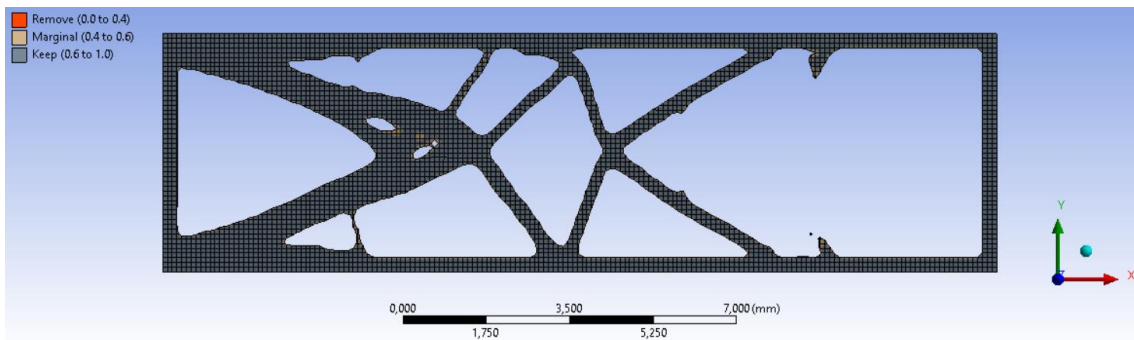


Figura N.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 30%.

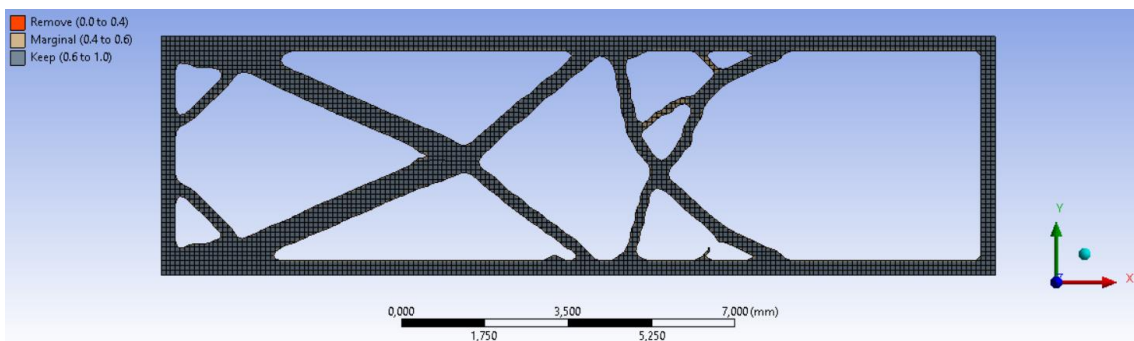


Figura N.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 25%.

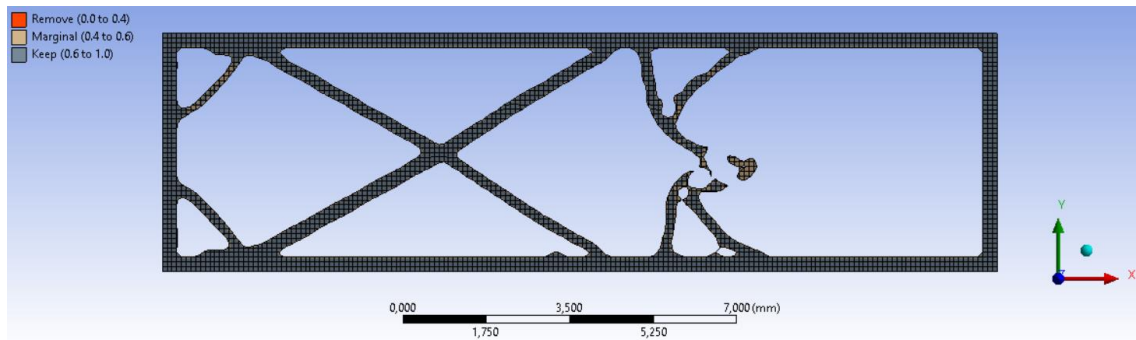


Figura N.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ rest. fabrico – iteração 20%.

## ANEXO O

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez dinâmica da microviga com 5 mm de espessura, com a restrição efetuada de fabrico.

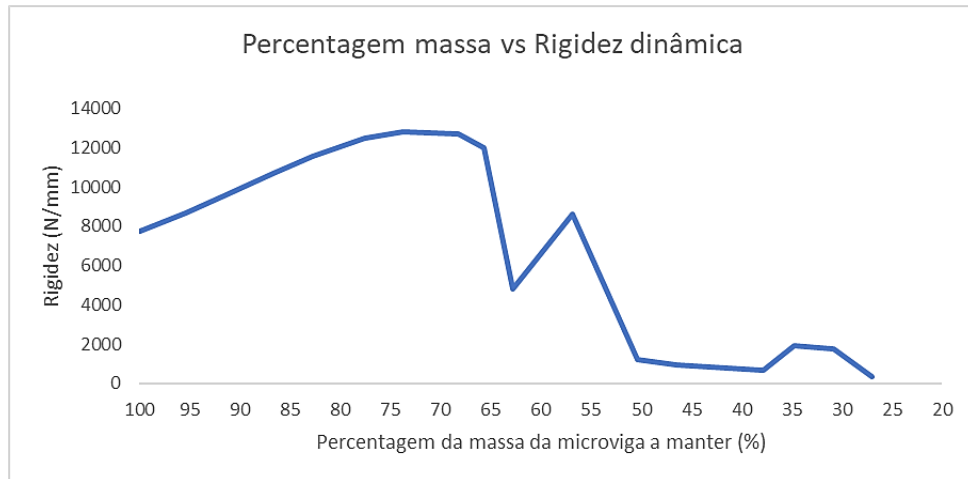


Figura O.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de fabrico.

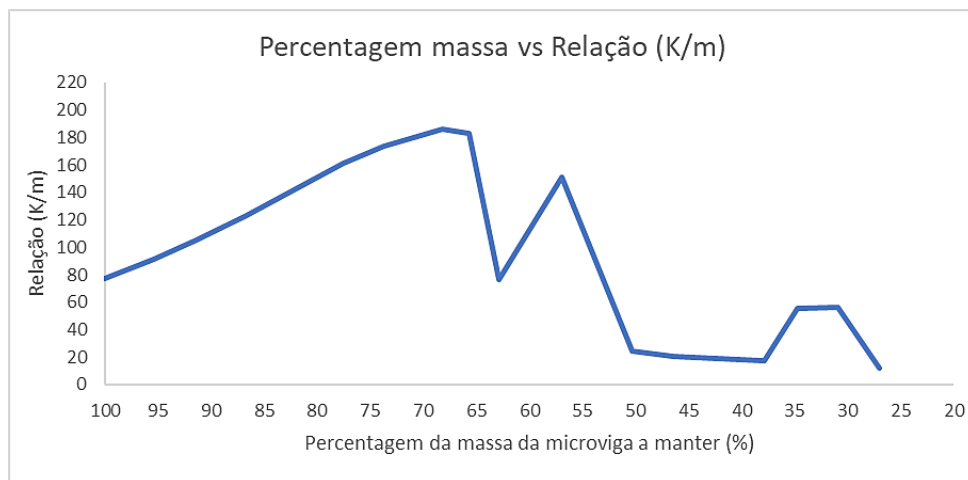


Figura O.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com restrição de fabrico.



## ANEXO P

No presente anexo encontram-se apresentados as microvigas otimizadas com otimização pelo método modal, com 5 mm de espessura, com massa concentrada na extremidade livre da microviga e com restrição de fabrico.

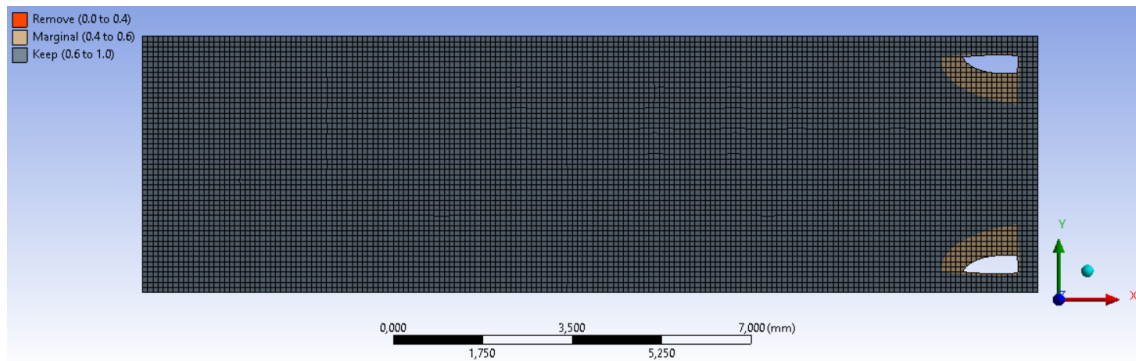


Figura P.1 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 95%.

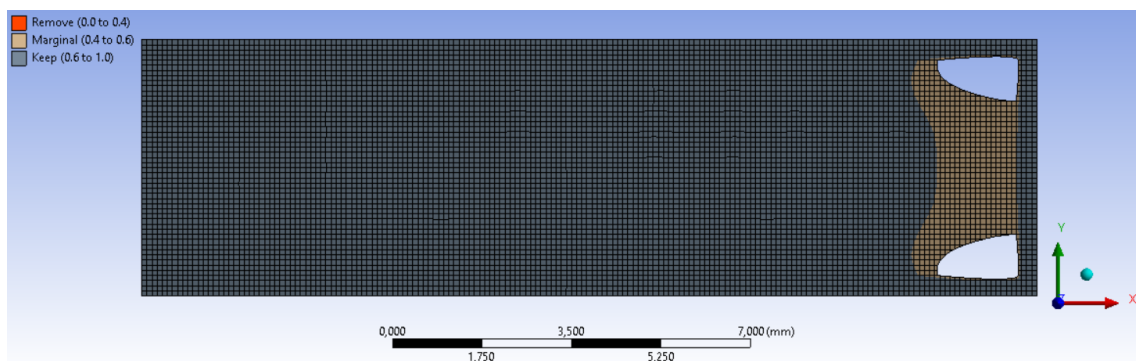


Figura P.2 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 90%.

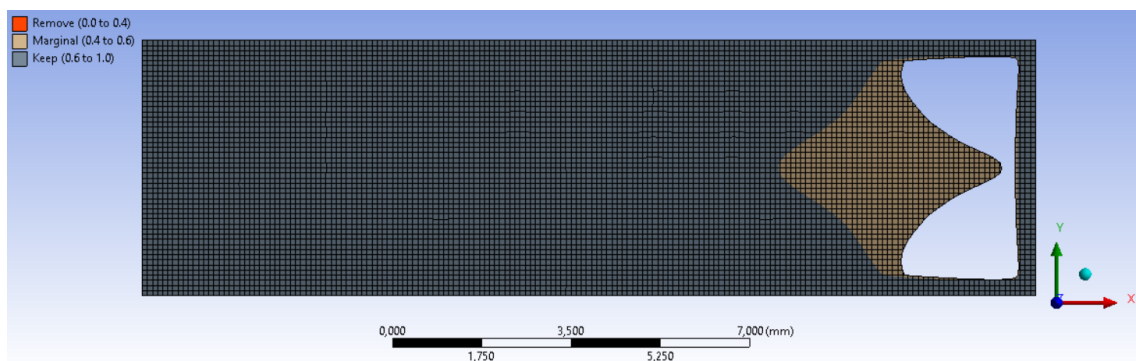


Figura P.3 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 85%.

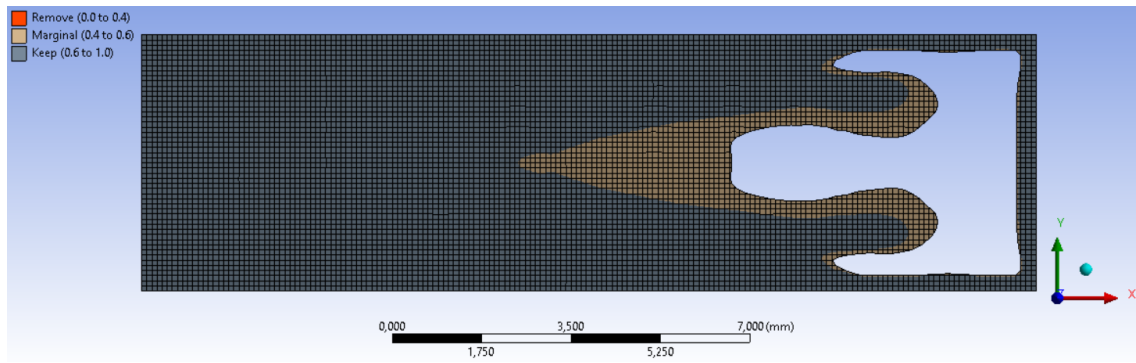


Figura P.4 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 80%.

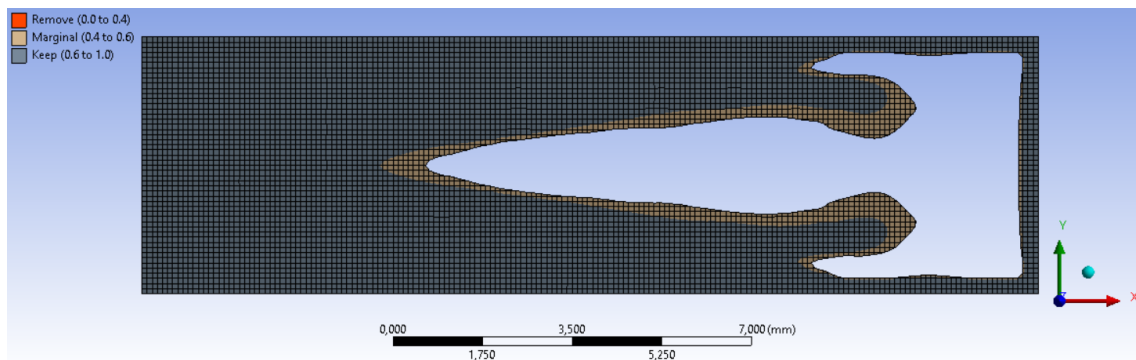


Figura P.5 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 75%.

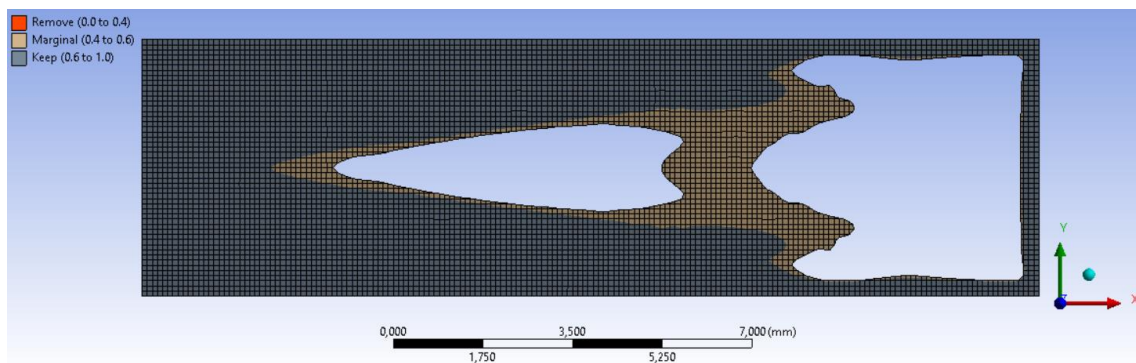


Figura P.6 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 70%.

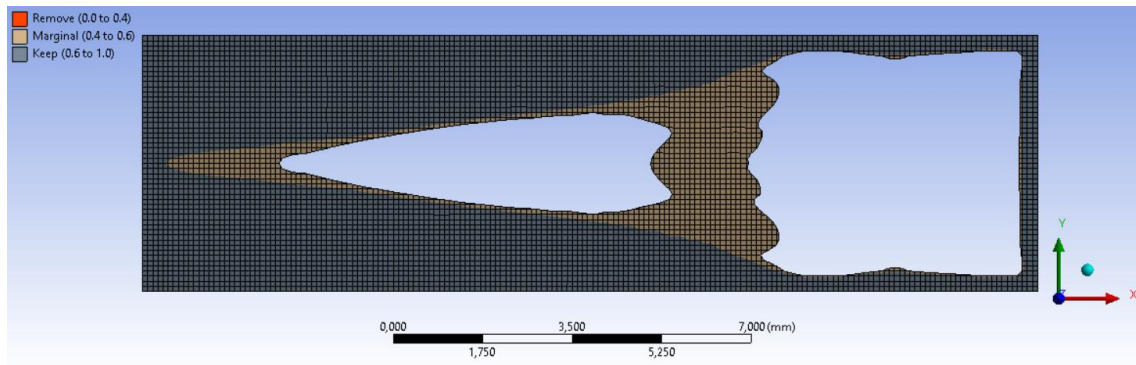


Figura P.7 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 65%.

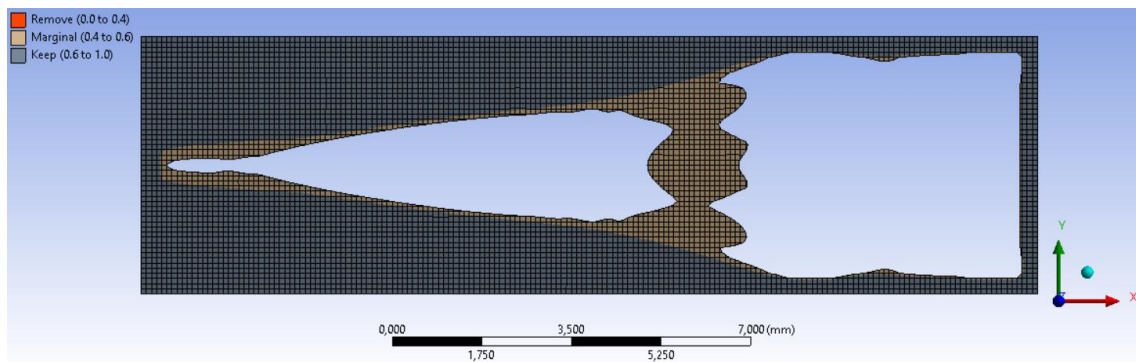


Figura P.8 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 60%.

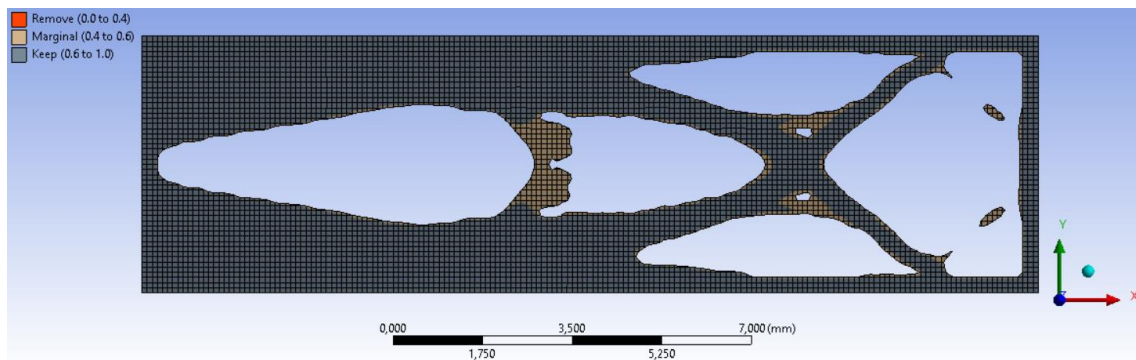


Figura P.9 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 55%.

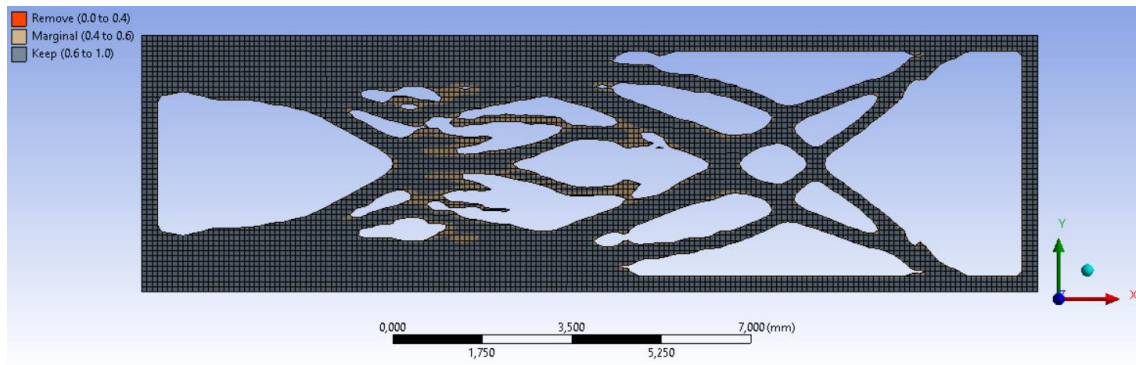


Figura P. 10 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 50%.

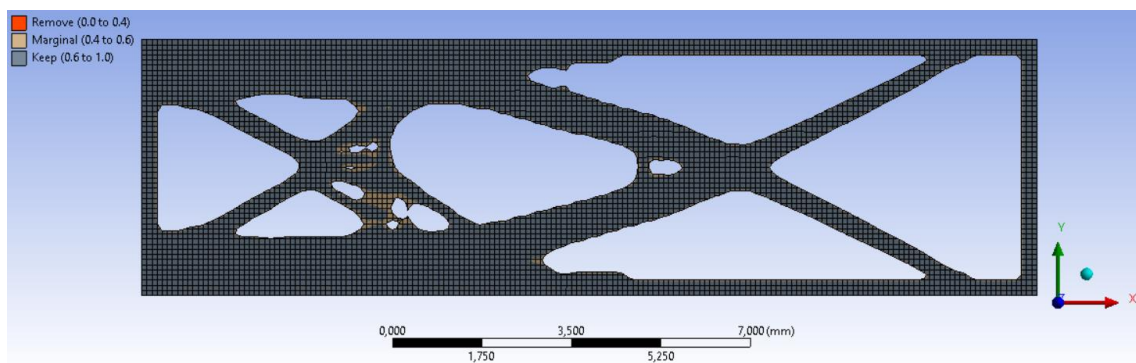


Figura P. 11 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 45%.

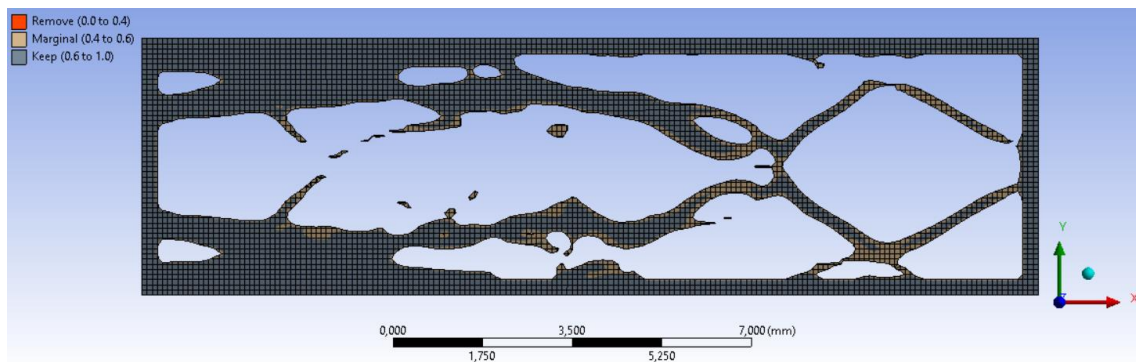


Figura P.12 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico – iteração dos 40%.

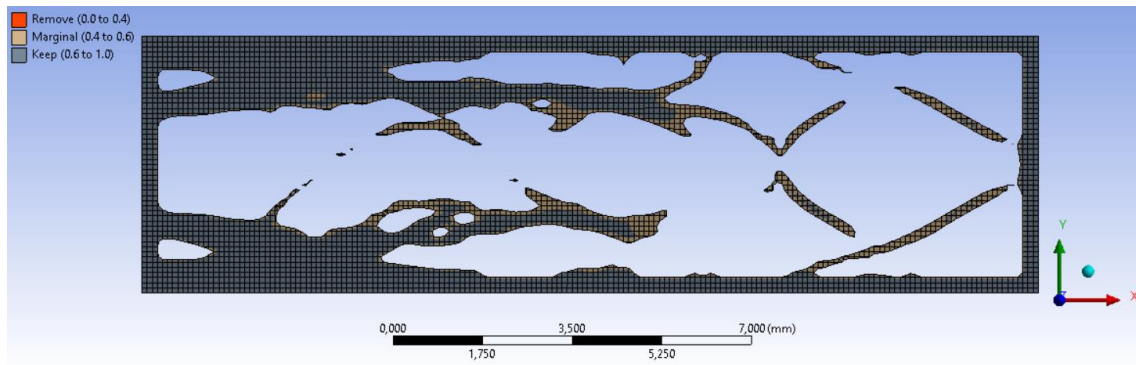


Figura P.13 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico - iteração dos 35%.

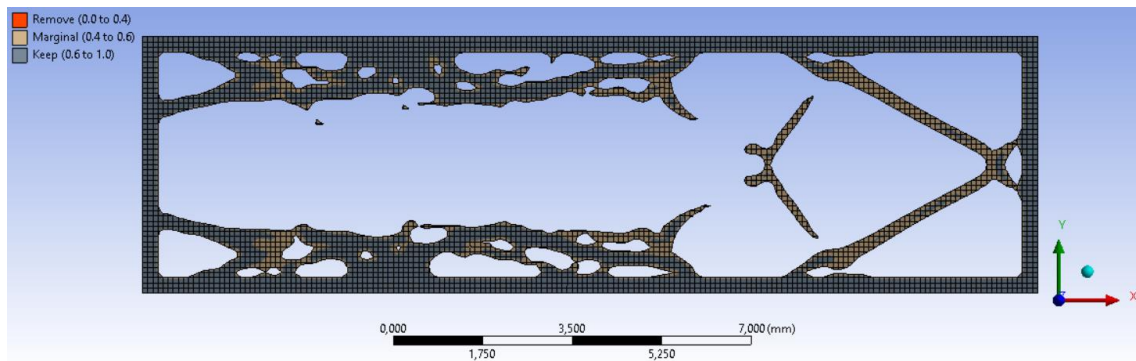


Figura P.14 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico - iteração dos 30%.

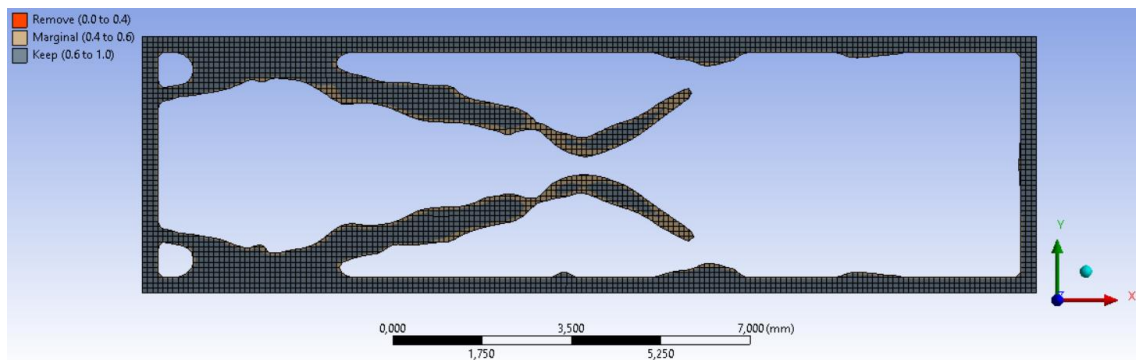


Figura P.15 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico - iteração dos 25%.

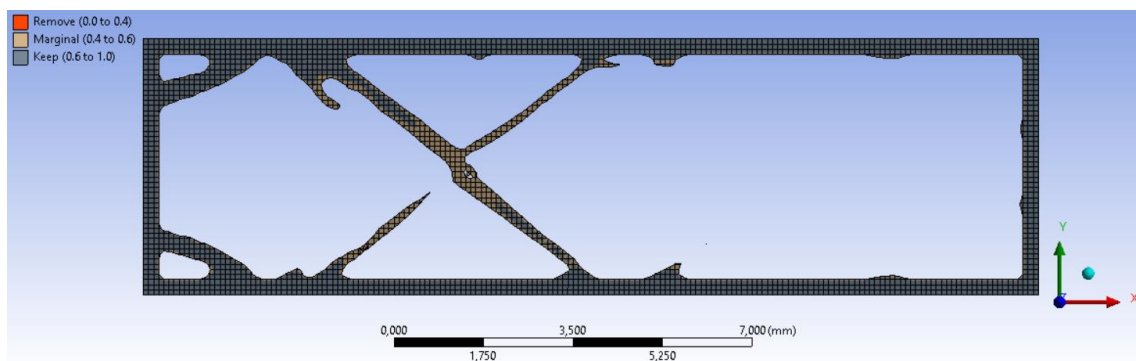


Figura P.16 - Topologia da microviga de 5 mm, com otimização no modo Modal, c/ massa concentrada e rest. fabrico - iteração dos 20%.

## ANEXO Q

Neste encontram-se apresentados os resultados obtidos de rigidez dinâmica da microviga com 5 mm de espessura, com massa concentrada e com a restrição efetuada de fabrico.

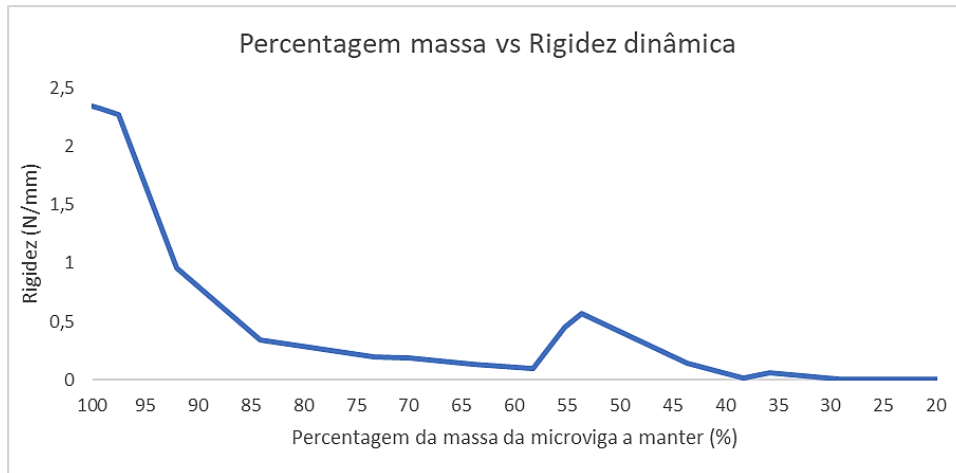


Figura Q.1 - Gráfico da percentagem massa vs rigidez dinâmica com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada, com restrição de fabrico.

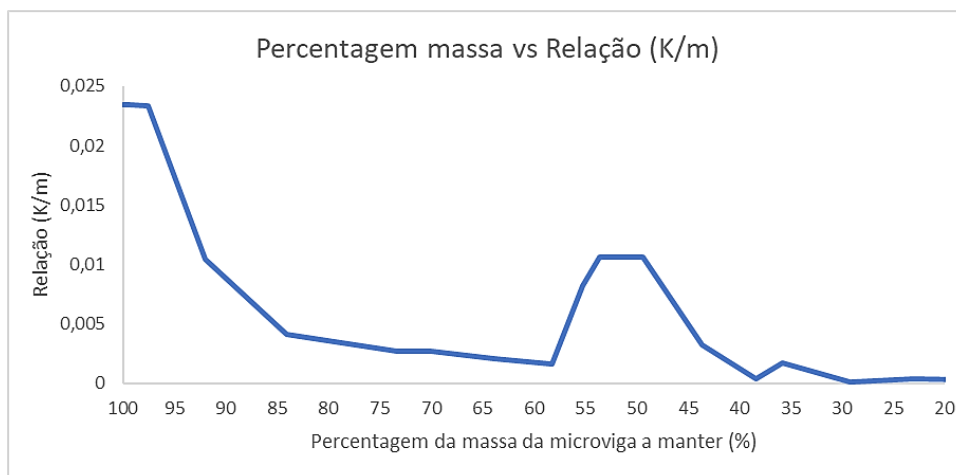


Figura Q.2 - Gráfico da percentagem massa vs relação (K/m) com otimização da microviga de 5 mm de espessura, com massa concentrada, com restrição de fabrico.

## BIBLIOGRAFIA

1. Wang, Q., et al., *Comprehensive investigation on the cause of a critical crack found in a diagonal member of a steel truss bridge*. Engineering Structures, 2017. 132: p. 659-670.
2. DebRoy, T. and H.K.D.H. Bhadeshia, *Secrets of Ageless Iron Landmarks*, in *Innovations in Everyday Engineering Materials*, T. DebRoy and H.K.D.H. Bhadeshia, Editors. 2021, Springer International Publishing: Cham. p. 121-131.
3. Tao, W. and M. Leu, *Design of lattice structure for additive manufacturing*. 2016. 325-332.
4. Singh, J., A. Upadhyay, and S.S. Sehgal, *A review on metallic micro lattice*. Materials Today: Proceedings, 2020. 33: p. 1695-1700.
5. Dangora, L.M., *Micro-lattice Materials and Their Potential Application in Structural Dynamics and Acoustics*, in *Recent Trends in Naval Engineering Research*, A.A. Ruffa and B. Toni, Editors. 2021, Springer International Publishing: Cham. p. 7-45.
6. SakshiKokil, S., et al., *Recent Advancements of Micro-Lattice Structures: Application, Manufacturing Methods, Mechanical Properties, Topologies and Challenges*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021. 46(12): p. 11587-11600.
7. Gibson, L.J., *Modelling the mechanical behavior of cellular materials*. Materials Science and Engineering: A, 1989. 110: p. 1-36.
8. Ashby, M., et al., *Metal Foams: A Design Guide*. 2000, Elsevier.
9. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2 ed. Cambridge Solid State Science Series. 1997, Cambridge: Cambridge University Press.
10. Nazir, A., et al., *A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. 104(9): p. 3489-3510.
11. Ashby, M., *The Properties of Foams and Lattices*. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 2006. 364: p. 15-30.
12. Scheffler, M. and P. Colombo, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, ed. J.W. Sons. 2006.
13. Evans, A.G., J.W. Hutchinson, and M.F. Ashby, *Multifunctionality of cellular metal systems*. Progress in Materials Science, 1998. 43(3): p. 171-221.
14. Yan, C., et al., *Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214(4): p. 856-864.
15. Seharing, A., A.H. Azman, and S. Abdullah, *A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts*. Advances in Mechanical Engineering, 2020. 12: p. 168781402091695.
16. Dong, G., Y. Tang, and Y.F. Zhao, *A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing*. Journal of Mechanical Design, 2017. 139(10).
17. Han, Y. and W.F. Lu, *A Novel Design Method for Nonuniform Lattice Structures Based on Topology Optimization*. Journal of Mechanical Design, 2018. 140(9).
18. Pan, C., Y. Han, and J. Lu *Design and Optimization of Lattice Structures: A Review*. Applied Sciences, 2020. 10, DOI: 10.3390/app10186374.
19. Xiong, J., et al., *Advanced Micro-Lattice Materials*. Advanced Engineering Materials, 2015. 17.
20. Queheillalt, D.T. and H.N.G. Wadley, *Cellular metal lattices with hollow trusses*. Acta Materialia, 2005. 53(2): p. 303-313.

21. Bauer, J., et al., *High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014. 111: p. 2453-8.
22. Parthasarathy, J., et al., *Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2010. 3(3): p. 249-259.
23. Mahshid, R., H.N. Hansen, and K.L. Højbjerg, *Strength analysis and modeling of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting for tooling applications*. Materials & Design, 2016. 104: p. 276-283.
24. Evans, A.G., et al., *Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices*. International Journal of Impact Engineering, 2010. 37(9): p. 947-959.
25. Schaedler, T.A., et al., *Designing Metallic Microlattices for Energy Absorber Applications*. Advanced Engineering Materials, 2014. 16(3): p. 276-283.
26. Ozdemir, Z., et al., *Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments*. International Journal of Impact Engineering, 2016. 89: p. 49-61.
27. Al-Saedi, D.S.J., et al., *Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM*. Materials & Design, 2018. 144: p. 32-44.
28. Linling, L., S. Liming, and Z. Xiaoyu, *Property Analysis of Periodic Lattice Structure with Considering its Size Effect*. Advances in Astronautics Science and Technology, 2022.
29. Syam, W.P., et al., *Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation*. Precision Engineering, 2018. 52: p. 494-506.
30. Yin, S., et al., *Damping and low-velocity impact behavior of filled composite pyramidal lattice structures*. Journal of Composite Materials, 2013. 48(15): p. 1789-1800.
31. Fink, K.D., et al., *Fluid dynamics of flow through microscale lattice structures formed from self-propagating photopolymer waveguides*. AIChE Journal, 2011. 57(10): p. 2636-2646.
32. Do, G., et al., *Additive manufacturing of interpenetrating periodic open cellular structures (interPOCS) with in operando adjustable flow characteristics*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2020. 148: p. 107786.
33. Kumar, A., et al., *Energy Absorption and Stiffness of Thin and Thick-Walled Closed-Cell 3D-Printed Structures Fabricated from a Hyperelastic Soft Polymer*. Materials, 2022. 15.
34. Nguyen, P.C.H., Y. Kim, and Y. Choi, *Lightweight design with metallic additively manufactured cellular structures*. Journal of Computational Design and Engineering, 2022. 9(1): p. 155-167.
35. Lakes, R., *Materials with structural hierarchy*. Nature, 1993. 361(6412): p. 511-515.
36. Snelling, D., et al., *Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds*. Advanced Engineering Materials, 2015. 17(7): p. 923-932.
37. Rashed, M.G., et al., *Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications*. Materials & Design, 2016. 95: p. 518-533.
38. Barynin, V.A., et al. *AEROSPACE COMPOSITE LATTICE STRUCTURES*. 1999.
39. Vasiliev, V.V. and A.F. Razin, *Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications*. Composite Structures, 2006. 76(1): p. 182-189.
40. Vasiliev, V.V., V.A. Barynin, and A.F. Razin, *Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications*. Composite Structures, 2012. 94(3): p. 1117-1127.
41. Totaro, G. and Z. Gürdal, *Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications*. Aerospace Science and Technology, 2009. 13(4): p. 157-164.
42. Zhu, L., N. Li, and P.R.N. Childs, *Light-weighting in aerospace component and system design*. Propulsion and Power Research, 2018. 7(2): p. 103-119.
43. Zhu, J.-H., W.-H. Zhang, and L. Xia, *Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016. 23(4): p. 595-622.



44. Moon, S.K., et al., *Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014. 1(3): p. 223-228.
45. Yin, S., et al., *Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood*. Composite Structures, 2018. 201: p. 131-140.
46. Magerramova, L., et al. *APPLICATION OF LIGHT LATTICE STRUCTURES FOR GAS TURBINE ENGINE FAN BLADES*. 2018.
47. Melchels, F.P.W., J. Feijen, and D.W. Grijpma, *A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering*. Biomaterials, 2010. 31(24): p. 6121-6130.
48. Jetté, B., et al., *Femoral stem incorporating a diamond cubic lattice structure: Design, manufacture and testing*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018. 77: p. 58-72.
49. Heintl, P., et al., *Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting*. Acta Biomaterialia, 2008. 4(5): p. 1536-1544.
50. Chen, W.M., S.J. Lee, and P.V.S. Lee, *Failure Analysis of an Additive Manufactured Porous Titanium Structure for Orthopedic Implant Applications*. Materials Science Forum, 2016. 863: p. 45-49.
51. Dumas, M., P. Terriault, and V. Brailovski, *Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials*. Materials & Design, 2017. 121: p. 383-392.
52. du Plessis, A., et al., *Numerical comparison of lattice unit cell designs for medical implants by additive manufacturing*. Virtual and Physical Prototyping, 2018. 13(4): p. 266-281.
53. Liu, F., et al. *Mechanical Properties of Optimized Diamond Lattice Structure for Bone Scaffolds Fabricated via Selective Laser Melting*. Materials, 2018. 11, DOI: 10.3390/ma11030374.
54. Kooistra, G.W. and H.N.G. Wadley, *Lattice truss structures from expanded metal sheet*. Materials & Design, 2007. 28(2): p. 507-514.
55. Wadley, H.N.G., N.A. Fleck, and A.G. Evans, *Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures*. Composites Science and Technology, 2003. 63(16): p. 2331-2343.
56. Deshpande, V.S. and N.A. Fleck, *Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending*. International Journal of Solids and Structures, 2001. 38(36): p. 6275-6305.
57. Deshpande, V.S., N.A. Fleck, and M.F. Ashby, *Effective properties of the octet-truss lattice material*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001. 49(8): p. 1747-1769.
58. Wang, J., et al., *On the performance of truss panels with Kagomé cores*. International Journal of Solids and Structures, 2003. 40(25): p. 6981-6988.
59. Smith, M.I.H., *The Comprehensive Response of Novel Lattice Structures Subjected to Static and Dynamic Loading*. 2012, University of Liverpool, Tese de Doutorado.
60. Chen, L.-Y., et al., *Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021. 146: p. 100648.
61. Li, N., et al., *Progress in Additive Manufacturing on New Materials*. Journal of Materials Science & Technology, 2018. 35.
62. Matos, F., et al. *Additive Manufacturing Technology: Designing New Business Models*. 2021.
63. ISO/ASTM\_52900, *Additive manufacturing. General principles. Terminology*. 2015.
64. Bikas, H., P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 83(1): p. 389-405.

65. Jiang, J., X. Xu, and J. Stringer *Support Structures for Additive Manufacturing: A Review*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018. 2.
66. Karamooz Ravari, M.R., et al., *Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling*. International Journal of Mechanical Sciences, 2014. 88: p. 154-161.
67. Calignano, F., et al., *Overview on Additive Manufacturing Technologies*. Proceedings of the IEEE, Proc. IEEE, 2017. 105(4): p. 593-612.
68. Tang, Y., et al., *Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process*. Materials Science and Technology, 2016. 32(7): p. 648-656.
69. Hussein, A.Y., *The Development of Lightweight Cellular Structures for Metal Additive Manufacturing*. 2013, University of Exeter, Tese de Douturamento.
70. Bremen, S., W. Meiners, and A. Diatlov, *Selective Laser Melting*. Laser Technik Journal, 2012. 9(2): p. 33-38.
71. Mierzejewska, Ż. and W. Markowicz, *Selective Laser Sintering – Binding Mechanism And Assistance In Medical Applications*. Advances in Materials Science, 2015. 15.
72. Wong, K., K.V. Wong, A.Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering, Vol 2012 (2012), Article ID 208760, 10 pages*. ISRN Mechanical Engineering, 2012. 2012.
73. Molitch-Hou, M., *1 - Overview of additive manufacturing process*, in *Additive Manufacturing*, J. Zhang and Y.-G. Jung, Editors. 2018, Butterworth-Heinemann. p. 1-38.
74. Mekonnen, B.G., G. Bright, and A. Walker, *A study on state of the art technology of laminated object manufacturing (Lom)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016: p. 207-216.
75. Sing, S.L., et al., *2 - 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing*, in *Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)*, R. Narayan, Editor. 2020, Woodhead Publishing. p. 17-40.
76. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker, *Directed Energy Deposition Processes*, in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Editors. 2015, Springer New York: New York, NY. p. 245-268.
77. Lee, H.-K., *Effects of the cladding parameters on the deposition efficiency in pulsed Nd:YAG laser cladding*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. 202(1): p. 321-327.
78. Lewis, G.K. and E. Schlienger, *Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition*. Materials & Design, 2000. 21(4): p. 417-423.
79. Pagac, M., et al., *A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing*. Polymers, 2021. 13(4): p. 1-20.
80. Tempelman, E., H. Shercliff, and B.N. van Eyben, *Chapter 11 - Additive Manufacturing*, in *Manufacturing and Design*, E. Tempelman, H. Shercliff, and B.N. van Eyben, Editors. 2014, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 187-200.
81. Gibson, I., D. Rosen, and B. Stucker, *Vat Photopolymerization Processes*, in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Editors. 2015, Springer New York: New York, NY. p. 63-106.
82. Al Rashid, A., et al., *Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications*. Additive Manufacturing, 2021. 47: p. 102279.
83. Chaudhary, R.P., et al., *Additive manufacturing of polymer-derived ceramics: Materials, technologies, properties and potential applications*. Progress in Materials Science, 2022. 128: p. 100969.
84. Grant, P., et al., *Manufacture of electrical and magnetic graded and anisotropic materials for novel manipulations of microwaves*. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 2015. 373.

85. Tian, X., Z. Chen, and W. Zhou, *Study on the fabrication accuracy of ceramic parts by direct stereolithography*. Virtual and Physical Prototyping, 2012. 7: p. 195-202.
86. Chen, X., et al., *Cellular carbon microstructures developed by using stereolithography*. Carbon, 2017. 123: p. 34-44.
87. Kolan, K.C.R., et al. *Effect of architecture and porosity on mechanical properties of borate glass scaffolds made by selective laser sintering*. 2013. University of Texas at Austin (freeform).
88. Yap, C.Y., et al., *Review of selective laser melting: Materials and applications*. Applied Physics Reviews, 2015. 2(4): p. 041101.
89. Santorinaios, M., et al., *Crush behaviour of open cellular lattice structures manufactured using selective laser melting*. Vol. 85. 2006. 481-490.
90. Mehrpouya, M., et al., *Multimaterial powder bed fusion techniques*. Rapid Prototyping Journal, 2022. 28.
91. Hasan, R., *Progressive Collapse of Titanium Alloy Micro-lattice Structures Manufactured Using Selective Laser Melting*. 2013, University of Liverpool, Tese de Doutoramento.
92. Gibson, I., D.W. Rosen, and B.E. Stucker. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2009.
93. Murr, L., S. Gaytan, and E. Martinez, *Fabricating Functional Ti-Alloy Biomedical Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting*. Journal of Biotechnology & Biomaterials, 2012. 02.
94. Ataei, A., et al., *Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications*. Materials & Design, 2018. 137: p. 345-354.
95. Tofail, S.A.M., et al., *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. Materials Today, 2018. 21(1): p. 22-37.
96. Pérez, M., et al., *Current advances in additive manufacturing*. Procedia CIRP, 2020. 88: p. 439-444.
97. Thompson, M.K., et al., *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. CIRP Annals, 2016. 65(2): p. 737-760.
98. Bahini, I., et al., *Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 97(1): p. 147-161.
99. Boschetto, A. and L. Bottini, *Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing*. Journal of Materials Processing Technology, 2015. 219: p. 181-192.
100. PwC, *3D printing and the new shape of industrial manufacturing*. 2014, Price Waterhouse Coopers LLP.
101. Waller, J., et al., *Summary of NDE of additive manufacturing efforts in NASA*. Vol. 1650. 2015.
102. Duda, T. and L.V. Raghavan, *3D metal printing technology: the need to re-invent design practice*. AI & SOCIETY, 2018. 33(2): p. 241-252.
103. du Plessis, A., et al., *Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019. 27: p. 408-427.
104. Mun, J., et al., *Indirect additive manufacturing based casting of a periodic 3D cellular metal – Flow simulation of molten aluminum alloy*. Journal of Manufacturing Processes, 2015. 17: p. 28-40.
105. Carneiro, V.H., et al., *Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices*. Additive Manufacturing, 2020. 33: p. 101085.
106. Lott, P., et al., *Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM)*. Physics Procedia, 2011. 12: p. 683-690.
107. Yang, L., et al., *Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing*. International Journal of Solids and Structures, 2015. 69-70: p. 475-490.

108. Song, B., et al., *Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior*. Materials & Design (1980-2015), 2014. 54: p. 727-733.
109. Murr, L.E., et al., *Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010. 368: p. 1999 - 2032.
110. Demir, A.G., *Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures*. Optics and Lasers in Engineering, 2018. 100: p. 9-17.
111. Ibrahim, Y., et al., *Acoustic resonance testing of additive manufactured lattice structures*. Additive Manufacturing, 2018. 24: p. 566-576.
112. McGregor, D.J., S. Tawfick, and W.P. King, *Automated metrology and geometric analysis of additively manufactured lattice structures*. Additive Manufacturing, 2019. 28: p. 535-545.
113. Qiu, C., et al., *Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting*. Materials Science and Engineering: A, 2015. 628: p. 188-197.
114. Du Plessis, A., et al. *Mechanical Properties and In Situ Deformation Imaging of Microlattices Manufactured by Laser Based Powder Bed Fusion*. Materials, 2018. 11, DOI: 10.3390/ma11091663.
115. West, B.M., et al., *Modal analysis of metal additive manufactured parts*. Manufacturing Letters, 2017. 13: p. 30-33.
116. Kok, Y., et al., *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review*. Materials & Design, 2018. 139: p. 565-586.
117. Li, X. and W. Tan, *Numerical investigation of effects of nucleation mechanisms on grain structure in metal additive manufacturing*. Computational Materials Science, 2018. 153: p. 159-169.
118. Shim, D.-S., et al., *Additive manufacturing of porous metals using laser melting of Ti6Al4V powder with a foaming agent*. Materials Research Express, 2018. 5(8): p. 086518.
119. Dressler, A.D., et al., *Heterogeneities dominate mechanical performance of additively manufactured metal lattice struts*. Additive Manufacturing, 2019. 28: p. 692-703.
120. Santos, L.S., S.K. Gupta, and H.A. Bruck, *Simulation of buckling of internal features during selective laser sintering of metals*. Additive Manufacturing, 2018. 23: p. 235-245.
121. Herzog, D., et al., *Additive manufacturing of metals*. Acta Materialia, 2016. 117: p. 371-392.
122. Zinovieva, O., A. Zinoviev, and V. Ploshikhin, *Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during metal additive manufacturing*. Computational Materials Science, 2018. 141: p. 207-220.
123. Carneiro, V.H., H. Puga, and J. Meireles, *Heat treatment as a route to tailor the yield-damping properties in A356 alloys*. Materials Science and Engineering: A, 2018. 729: p. 1-8.
124. Carneiro, V.H. and H. Puga, *Solution Treatment Enhances Both Static and Damping Properties of Al-Si-Mg alloys*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018. 49(12): p. 5942-5945.
125. Puga, H., et al., *Effect of grain and secondary phase morphologies in the mechanical and damping behavior of Al7075 alloys*. Metals and Materials International, 2016. 22(5): p. 863-871.
126. Tang, Y., et al., *Micro-mould fabrication for a micro-gear via vacuum casting*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. 192-193: p. 334-339.
127. Xue, Y., W. Wang, and F. Han, *Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers*. Composites Part B: Engineering, 2019. 171: p. 183-191.
128. Yang, C., et al., *Micro precision casting based on investment casting for micro structures with high aspect ratio*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009. 19: p. s521-s525.

129. Snelling, D.A., C.B. Williams, and A.P. Druschitz, *Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds*. Additive Manufacturing, 2019. 27: p. 199-207.
130. Xue, Y., et al., *Compressive property of Al-based auxetic lattice structures fabricated by 3-D printing combined with investment casting*. Materials Science and Engineering: A, 2018. 722: p. 255-262.
131. Bassoli, E., et al., *3D printing technique applied to rapid casting*. Rapid Prototyping Journal, 2007. 13(3): p. 148-155.
132. Krutiš, V., et al., *Requirements for Hybrid Technology Enabling the Production of High-Precision Thin-Wall Castings*. Materials, 2022. 15: p. 3805.
133. Parlad, K., S. Rupinder, and I.P.S. Ahuja, *A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process*. Asian Review of Mechanical Engineering, 2013. 2(2): p. 49-55.
134. Carneiro, V.H., et al., *Influência do Coeficiente de Poisson no Colapso de Sólidos Celulares Não-Estocásticos*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2020. 32: p. 83-91.
135. Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*. Third ed. 2005: Elsevier.
136. Peixinho, N., *Mecânica Computacional – Método dos Elementos Finitos, "Texto de apoio da unidade curricular "Mecânica Computacional"*. 2011.
137. Tekkaya, A.E. and C. Soyarslan, *Finite Element Method*, in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, L. Laperrière and G. Reinhart, Editors. 2014, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 508-514.
138. Meireles, J.F.B., *Análise Dinâmica de Estruturas por Modelos de Elementos Finitos Identificados Experimentalmente*. 2007, Universidade do Minho, Tese de Doutoramento.
139. Okumoto, Y., et al., *Finite Element Method*, in *Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers*, Y. Okumoto, et al., Editors. 2009, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 125-140.
140. Azevedo, Á.F.M., *Método dos Elementos Finitos*. 1ª ed. 2003.
141. Ashcroft, I.A. and A. Mubashar, *Numerical Approach: Finite Element Analysis*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2018, Springer International Publishing: Cham. p. 701-739.
142. Dourado, M. and J. Meireles, *Obtenção de um modelo de elementos finitos simplificado para representação de juntas rebitadas em análise dinâmica de estruturas usando uma ferramenta de updating*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 2016. 32(3): p. 173-180.
143. Meireles, J., *Capítulo VII-Introdução à análise modal, "PPT de apoio à unidade curricular Dinâmica de Estruturas"*. 2021.
144. Zhu, J., et al., *A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges*. Chinese Journal of Aeronautics, 2021. 34(1): p. 91-110.
145. Bendsøe, M.P. and O. Sigmund, *Topology Optimization - Theory, Methods, and Applications*. 2003: Springer Verlag.
146. Jankovics, D. and A. Barari, *Customization of Automotive Structural Components using Additive Manufacturing and Topology Optimization*. IFAC-PapersOnLine, 2019. 52(10): p. 212-217.
147. Huang, X. and Y. Xie, *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures*. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, 2010.
148. Blakey-Milner, B., et al., *Metal additive manufacturing in aerospace: A review*. Materials & Design, 2021. 209: p. 110008.
149. Sigmund, O. and K. Maute, *Topology optimization approaches*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013. 48(6): p. 1031-1055.

150. Jewett, J.L. and J.V. Carstensen, *Topology-optimized design, construction and experimental evaluation of concrete beams*. Automation in Construction, 2019. 102: p. 59-67.
151. Gunwant, D. and A. Misra, *TOPOLOGY OPTIMIZATION OF CONTINUUM STRUCTURES USING OPTIMALITY CRITERION APPROACH IN ANSYS*. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2012. 5: p. 470-485.
152. Kohnke, P.C. and I. ANSYS, *ANSYS Theory Reference: Release 5.6*. 1999: ANSYS Incorporated.
153. Jiang, W., et al., *Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting*. Materials Science and Engineering: A, 2013. 560: p. 396-403.
154. Carneiro, V.H., et al., *Macro-, meso- and microstructural characterization of metallic lattice structures manufactured by additive manufacturing assisted investment casting*. Scientific Reports, 2021. 11(1): p. 4974.
155. Kim, K.-o., *A review of mass matrices for eigenproblems*. Computers & Structures, 1993. 46(6): p. 1041-1048.
156. Yamada, T. *Thickness Constraints for Topology Optimization Using the Fictitious Physical Model*. in *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*. 2019. Cham: Springer International Publishing.
157. Bhuvanesh Kumar, M. and P. Sathiya, *Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges*. Thin-Walled Structures, 2021. 159: p. 107228.
158. Barbosa, J., *Processos de Fundição*. 1ª ed. Vol. 1. 2017.
159. Pattnaik, S., D.B. Karunakar, and P.K. Jha, *Developments in investment casting process—A review*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. 212(11): p. 2332-2348.
160. Carneiro, V.H., et al. *The Influence of Precipitation Hardening on the Damping Capacity in Al—Si—Mg Cast Components at Different Strain Amplitudes*. Metals, 2022. 12.